

Institution

Hochschule Geisenheim University

**Projekttitel**

Klimawandelbedingte Änderungen des Wasserbedarfs und der Stickstoff-Düngung für den Gemüseanbau im Hessischen Ried

- Abschlussbericht -

Laufzeit

10 / 2010 bis 12 / 2015

Projektleitung

Prof. Dr. Jana Zinkernagel

Projektpartner

Dr. Georg Berthold (georg.berthold@hlnug.hessen.de)

Projektbearbeitung

Prof. Dr. Jana Zinkernagel (jana.zinkernagel@hs-gm.de)

M. Sc. Nadine Schmidt (nadine.schmidt@hs-gm.de)

Norbert Mayer (norbert.mayer@hs-gm.de)

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Geisenheim, Juli 2017

INHALTSVERZEICHNIS

1.	ABSTRACT	1
2.	ZUSAMMENFASSUNG	3
3.	EINLEITUNG	6
3.1.	Projektziele	7
4.	DATEN UND METHODIK	9
4.1.	Untersuchungsgebiet Hessisches Ried	9
4.1.1.	Klima und Geologie im Hessischen Ried	9
4.1.2.	Pflanzenverfügbare Wassergehalt von Böden im Hessischen Ried	10
4.1.3.	Gemüseanbau im Hessischen Ried	13
4.1.4.	Bewässerung im Hessischen Ried	14
4.2.	Datengrundlage	15
4.2.1.	Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle	18
4.2.2.	Daten des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG 2010	18
4.2.3.	Einschränkungen	18
4.3.	Phänologie	19
4.3.1.	Thermische Vegetationsperiode	20
4.4.	Modell zur kulturspezifischen Zusatzwasserbedarfsermittlung im Hessischen Ried	21
4.4.1.	Einführung.....	21
4.4.2.	Kulturauswahl unter Berücksichtigung bewässerungsrelevanter Kulturdaten	22
4.4.2.1.	Sommertrockenzwiebel (<i>Allium cepa</i>)	22
4.4.2.2.	Buschbohne (<i>Phaseolus vulgaris</i>).....	23
4.4.2.3.	Bleichspargel (<i>Asparagus officinalis</i> L.)	24
4.4.2.4.	Bestimmen des Kulturbeginns anhand physiologischer Merkmale der Kulturen	25
4.4.3.	Klimatische Wasserbilanz.....	25
4.4.4.	Festlegen der k_c - Umstelltermine.....	26

4.4.5.	Bodenkenngrößen und -parameter.....	27
4.4.6.	Berechnung der täglichen Wasserbilanz	28
4.5.	Kosten für den Zusatzwasserbedarf	29
4.5.1.	Bewässerungstechnik	29
4.5.2.	Kalkulationsgrundlagen	30
4.6.	Modellversuch zur Bewässerung und Stickstoffverlagerung von Zwiebeln im Lysimeter	32
4.6.1.	Versuchsvarianten	32
4.6.2.	Versuchsdurchführung.....	33
4.6.3.	Datenerfassung.....	35
4.7.	Statistische Auswertung.....	36
5.	ERGEBNISSE.....	38
5.1.	Klimaparameter.....	38
5.1.1.	Niederschlag	38
5.1.2.	Trockenperioden	39
5.1.3.	Klimatische Wasserbilanz.....	43
5.2.	Thermische Vegetationsperiode	46
5.3.	Kulturspezifischer Wasserbedarf.....	47
5.3.1.	Kulturspezifischer Wasserbedarf OHNE Verschiebung der Vegetationsperiode	48
5.3.1.1.	Zwiebel	48
5.3.1.2.	Buschbohne.....	54
5.3.1.3.	Spargel	59
5.3.2.	Kulturspezifischer Wasserbedarf MIT Verschiebung der Vegetationsperiode	64
5.3.2.1.	Zwiebel	64
5.3.2.2.	Buschbohne.....	72
5.3.2.3.	Spargel	77

5.3.3.	Fazit	83
5.4.	Entwicklung, Wasser- und Stickstoffhaushalt von Zwiebeln (Lysimeter)	85
5.4.1.	Pflanzenentwicklung	85
5.4.2.	Wasserhaushalt	88
5.4.3.	Stickstoffhaushalt.....	91
5.5.	Kostenkalkulation für die Bewässerung im Gemüsebau	93
6.	DISKUSSION.....	95
6.1.	Klimatische Veränderungen im Hessischen Ried	95
6.2.	Konsequenzen einer veränderten Vegetationszeit und Pflanzenentwicklung	95
6.3.	Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf für den Gemüsebau.....	97
6.4.	Nitrataustrag ins Grundwasser (Modellversuch Lysimeter)	98
6.4.1.	Maßnahmen zur Reduzierung des Nitrataustrags.....	101
6.5.	Bewässerungsverfahren und Methoden zur Bewässerungssteuerung.....	102
6.6.	Mögliche Auswirkungen auf den zukünftigen Gemüseanbau	103
7.	AUSBLICK UND FORSCHUNGSBEDARF	105
8.	ABWEICHUNGEN VOM URSPRÜNGLICHEN ARBEITSPLAN.....	106
9.	LITERATUR.....	107
10.	ANHANG	114

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Bodenkarte der BFD 50 Bodentypen für das Hessische Ried (Bodenviewer, HLNUG 2016)	10
Abbildung 2:	Pflanzenverfügbare Wassergehalt von Ackerböden im Hessischen Ried - mittlere nutzbare Feldkapazität pro Gemeinde [in mm je 30 cm Bodenschicht] (HLNUG 2011)	12
Abbildung 3:	IDP - Karten [exemplarisch] für die Zuordnung der Gitterpunkte bzw. Stationen, die die Modellregion „Hessisches Ried“ in der Fläche abdecken für a) C-CLM, b) REMO und c) WETTREG 2010 jeweils angetrieben durch ECHAM5 am Beispiel für den Niederschlag im meteorologischen Jahr für den Zeitraum 1971 - 2000 (Farbskala: Niederschlag < 500 mm grün bis > 1000 mm Purpur). Die rote Markierung stellt die Modellregion Hessisches Ried dar.	17
Abbildung 4:	Schematische botanische Darstellung von Sommertrockenzwiebel (<i>Allium cepa</i>)	22
Abbildung 5:	Schematische botanische Darstellung von Buschbohne (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	23
Abbildung 6:	Schematische botanische Darstellung von Spargel (<i>Asparagus officinalis</i> L.)	24
Abbildung 7:	a) Schematische Darstellung der Geisenheimer Lysimeter b) Geisenheimer Lysimeteranlage mit Zwiebeln im Jahr 2013. In den aufgehängten grünen Kanistern befinden sich die behälterspezifisch abgemessenen Wassermengen, die über Tropfschläuche verteilt werden. Im Hintergrund sind die fahrbaren, sensorgesteuerten Regenschutzdächer zu sehen. c) Draufsicht Lysimeter mit Zwiebeln und Tropfbewässerung.	35
Abbildung 8:	Simulierte Veränderung [%] der monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der zukünftigen Perioden 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.	39
Abbildung 9:	Absolute maximale Dauer niederschlagsfreier Zeiträume im Hessischen Ried basierend auf der jeweiligen, modellbezogenen Häufigkeitsverteilung mit WETTREG 2010, REMO sowie C-CLM, jeweils angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3.	40
Abbildung 10:	Simulierte Veränderung [%] des monatlichen Maximums der Dauer niederschlagsfreier Perioden pro Monat (I bis XII) für die Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 jeweils im Vergleich zur Referenz von 1971 - 2000 für alle Modellkombinationen.	41
Abbildung 11:	Simulierte Häufigkeit der verschiedenen Dauern niederschlagsfreier Perioden unter Einhaltung der Monatsgrenzen (= monatliches Maximum der Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag) für die 30jährigen Perioden 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit WETTREG 2010, REMO sowie C-CLM (jeweils angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3) innerhalb der Vegetationsperiode (März - Oktober) für das Hessische Ried (Flächenmittel).	42
Abbildung 12:	30jährige Mittelwerte der Jahressummen von Niederschlag und Verdunstung sowie daraus resultierende klimatische Wasserbilanz [mm] für das Hessische Ried (Flächenmittel) innerhalb sowie außerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 - 2000 (Referenz) sowie 2031 - 2060 und 2071 - 2100.	45

-
- Abbildung 13:** Simulierte Veränderung der thermischen Vegetationsperiode für das Hessische Ried (Flächenmittel) für die Modellkombination a) C-CLM (ECHAM5), b) C-CLM (HadCM3), c) REMO (ECHAM5) und d) WETTREG 2010 (ECHAM5) für das Szenario A1B. Dargestellt ist die Veränderung in Tagen für den Start, das Ende und die daraus resultierende Länge der thermischen Vegetationsperiode basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000. 47
- Abbildung 14:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Zwiebel für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Aussaattermin für Zwiebeln einheitlich jeweils am 15. März. 50
- Abbildung 15:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Zwiebeln im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 51
- Abbildung 16:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Zwiebeln während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 52
- Abbildung 17:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Zwiebel ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 53
- Abbildung 18:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Buschbohne für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Werte bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Aussaattermin für Buschbohnen einheitlich jeweils am 15. Mai. 56
- Abbildung 19:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Buschbohne im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 57
- Abbildung 20:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Buschbohne während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 58
- Abbildung 21:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Buschbohne ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 59

-
- Abbildung 22:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen des Spargels für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Beginn der Stechzeit für Spargel einheitlich jeweils am 15. April... 61
- Abbildung 23:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Spargel im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%) 62
- Abbildung 24:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Spargel während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 63
- Abbildung 25:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Spargel ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 64
- Abbildung 26:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Zwiebel für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c Werte bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000. 67
- Abbildung 27:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Zwiebeln im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 69
- Abbildung 28:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Zwiebeln während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 70
- Abbildung 29:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Zwiebeln unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 71
- Abbildung 30:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Buschbohne für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000. 74

-
- Abbildung 31:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Buschbohne im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 75
- Abbildung 32:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Buschbohne während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 76
- Abbildung 33:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Buschbohne unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 77
- Abbildung 34:** Simulierte phänologische Entwicklungsstufen des Spargels für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000. 79
- Abbildung 35:** Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Spargel im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 80
- Abbildung 36:** Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Spargel während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 81
- Abbildung 37:** Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Spargel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)..... 82
- Abbildung 38:** Zeitlicher Verlauf des Bedeckungsgrads (%) bei Zwiebeln in 420 L Gefäßen mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013. A, B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$ 86
- Abbildung 39:** Frischmasse (kg/m^2) von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013 (a,b,c: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey; $\alpha=0,05$). 87
- Abbildung 40:** A) Zeitlicher Verlauf der Sickerwassermengen (mm), B) der Nitratgehalte ($\text{mg NO}_3/\text{L}$) im Sickerwasser und C) des N-Austrags (kg N/ha) bei Zwiebeln im Lysimeter mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013. 90

Abbildung A 1: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Groß-Gerau – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015)	116
Abbildung A 2: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Darmstadt-Dieburg – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015).....	116
Abbildung A 3: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Bergstraße – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015).....	117
Abbildung A 4: Nitratgehalte in Hessischen Grund- und Rohwässern – Mittelwerte 2015. Kartenausschnitt für das Hessische Ried (HLNUG 2016)	118

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Richtwerte für die nutzbare Feldkapazität (nFK), den Totwasseranteil (TW) und die Feldkapazität (FK) in Abhängigkeit der Bodenverhältnisse (HLNUG, 2008a)	11
Tabelle 2:	Anbau, Ertrag und Ernte ausgewählter Gemüsearten im Freiland in Hessen 2015 ...	13
Tabelle 3:	Pflanzenkoeffizienten (k_c Werte) zum Steuern der Bewässerung nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung bei Verwendung der FAO 56 Grasreferenzverdunstung anhand phänologischer Stadien (BBCH Code)	26
Tabelle 4:	Erforderliche Temperatursumme ($^{\circ}\text{Cd}$) für die k_c - Umstelltermine je nach Gemüseart	27
Tabelle 5:	nFK Werte für die Bodenklassen in 30, 60 und 90 cm Bodentiefe (HLNUG, 2008a)..	28
Tabelle 6:	Beispielkalkulation der Betriebskosten bei fünf Zusatzwassergaben von jeweils 20 mm für Rohrberegnung (nach KTBL)	31
Tabelle 7:	Beispielkalkulation der Betriebskosten bei zehn Zusatzwassergaben von jeweils 4 mm und sechs Zusatzwassergaben von jeweils 10 mm für Tropfbewässerung (nach KTBL)	31
Tabelle 8:	Versuchsvarianten (n = 4 Behälter)	32
Tabelle 9:	Verteilung der monatlichen Niederschläge (mm) bei vier Niederschlagsszenarien, Zwiebel im Lysimeterversuch.	33
Tabelle 10:	Anbaudaten des Lysimeterversuchs mit Speisezwiebeln.....	34
Tabelle 11:	Umverteilung der Niederschläge im Hessischen Ried (Flächenmittel) im Projektionszeitraum 2071 - 2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971 - 2000 aus den modellbezogenen Niederschlagsdaten in Prozent	38
Tabelle 12:	Vergleich der Kulturdauer, der kulturspezifischen KWB, der Menge des Zusatzwasserbedarfs sowie der Anzahl der Zusatzwassergaben für die Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel für die Zeiträume 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 im Mittel über alle Modellkombinationen zwischen Anbau ohne und mit zeitlicher Anpassung.....	84
Tabelle 13:	Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2011 (Der Niederschlag wurde 2011 erst ab Mitte April simuliert) A, B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	89
Tabelle 14:	Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2012 a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	89
Tabelle 15:	Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2013 a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	89

Tabelle 16:	Austauschhäufigkeit von Lysimetern bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien infolge Sickerwasserbildung a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$; A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	91
Tabelle 17:	Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2011 a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$ A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	92
Tabelle 18:	Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2012 a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$ A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	92
Tabelle 19:	Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2013 a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$ A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$	93
Tabelle A 1:	Anbaufläche (in ha) der Gemüsekulturen Zwiebel, Spargel und Buschbohne im Freiland sowie der Anteil (in%) an der Gesamtfläche des Freilandgemüseanbaus der Jahre 2004 bis 2014 basierend auf der Agrarstatistik des Landes Hessen	114
Tabelle A 2:	Erhebung des Ertrags (in dt je ha) sowie des Gesamtertrages (in dt) der Gemüsekulturen Zwiebel, Spargel und Buschbohne der Jahre 2004 bis 2014 basierend auf der Agrarstatistik des Landes Hessen (Hessisches Statistisches Landesamt, Stand 2016)	115
Tabelle A 3:	Landwirtschaftliche Betriebe mit Bewässerung auf Freilandflächen 2009 - ohne Frostschutzberechnung - nach bewässerten Flächen, nach Bewässerungsverfahren und verbrauchter Wassermenge sowie nach der Wasserherkunft für Hessen (Landwirtschaftszählung Bewässerung, Hessisches Statistisches Landesamt 2010)	119
Tabelle A 4:	Übersicht der einzelnen, den Regionalisierungsmodellen zugeordneten Gitterpunkte bzw. Stationen, die das Hessische Ried in der Fläche abbilden. Klimastationen des Modell WETTREG 2010, welche die erforderlichen Daten für die Berechnung der Evapotranspiration nach FAO 56 bereitstellen, sind markiert [*].....	119
Tabelle A 5:	Verfügbare Daten der dynamischen Regionalmodelle C-CLM und REMO.....	121
Tabelle A 6:	Verfügbare Daten des statistischen Regionalmodells WETTREG 2010.....	121
Tabelle A 7:	Regenplan: Beispiel für den Monat Juli	122
Tabelle A 8:	Vergleich der Kosten [in € / ha x a] für die Bewässerung von Zwiebel, Buschbohne und Spargel mit Rohrberechnung und Tropfbewässerung unter klassischen Anbaubedingungen, d.h. keine Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode.	123

Tabelle A 9: Vergleich der Kosten [in € / ha x a] für die Bewässerung von Zwiebel, Buschbohne und Spargel mit Rohrberegnung und Tropfbewässerung unter variablen Anbaubedingungen, d.h. Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. 124

Tabelle A 10: Vergleich tolerierbarer Herbst-Nmin-Gehalte in kg N/ha verändert nach Hennings und Scheffer (2000) 125

1. Abstract

The Hessian Reed is an important growing region in Germany, in which the vegetable production represents a very high percentage. Local climate and the availability of water are the most important limiting factors. According to the fact, that irrigated agriculture is one of the largest consumers of water resources, the vulnerability of vegetable production is given by the discrepancy between crop specific high water demand and water availability for irrigation. Presumably, due to predicted climate change this discrepancy will become more severe. Furthermore, irrigation scheduling will become an important tool for developing best management practices to adapt to climate change.

Hence, it is of great importance to evaluate the potential future climate change impact on water supply, water demand and the consequences for vegetable production. Therefore, the focus is on the model crops onion, bush bean as well as asparagus, representing the main vegetable crops in the Hessian Reed.

The evaluation covers the trends of meteorological parameters relevant to cultivation, such as temperature, precipitation and evapotranspiration to assess the impact on future crop water requirements. An additional objective of this study is the estimation of possible future changes in water balance linked to the climate change impact on the relationship between precipitation and evapotranspiration. Furthermore, the focus is on crop-specific climatic water balance, considering soil characteristics and temperature-driven plant growth. Based on this, the risks and needs of future irrigation for vegetable crops are revealed due to simulation of extreme events, dry periods, crop-specific climatic water balance and additional irrigation requirement.

The future local climate conditions in Hessian Reed under the SRES scenario A1B are studied by using three 30-year time slice simulations (1971 - 2000, 2031 - 2060, 2071 - 2100) performed by three different regional climate models (RCM) C-CLM, WETTREG 2010 and REMO driven by global climate models (GCM) ECHAM5 and HadCM3. Analyzing the precipitation characteristics includes mean precipitation and rain event probability with special focus on distribution of precipitation and frequency as well as the length of drought periods. Evapotranspiration (ET_0) is calculated due to FAO 56 equation by using the RCM data during the growing season.

Nowadays, vegetables are commonly cultivated from March to October. In future, a shift in timing and in duration of the growing season is expected. Therefore, detecting climate change impacts on growing season is crucial for identifying the consequences for crop-specific growth and water demand at seasonal time scale. In order to sustain growth stage dates as well as duration and date of harvest in relation to climatic conditions, a simple approach based on accumulated temperature (T_{sum}) according to growth stage length was used. This approach is based on the assumption that growth occurs, when the temperature sum exceeds a threshold or rather a plant-specific amount of degree-days ($^{\circ}Cd$).

The crop specific irrigation water demand for common as well as temporally varying growing seasons is determined based on the Geisenheim Irrigation Scheduling (GS), a decision support system for irrigation locally developed under German climate conditions. The principle of GS is based on climatic water balance (CWB) method. The CWB performs a quantitative comparison of water input and output in an area of interest for a certain time period. The CWB is calculated as the difference between simulated precipitation (P) and reference evapotranspiration (ET_0) using a simple single crop coefficient approach that does not distinguish between plant and soil evapotranspiration separately. Regarding to irrigation management by using calculated crop specific CWB, a crop coefficient (k_c value) must be applied to adjust reference evapotranspiration for local conditions and type of crop being irrigated, because k_c value takes into account crop type and development.

In terms of future nitrogen fertilizing the simulations of RCMs are combined with lysimeter experiments to study the impacts of different climate scenarios on the water balance and to investigate seasonal precipitation contribution to nitrate leaching.

Generally, the simulation results highly vary between the regional climate models. However, consistently only minor changes in annual precipitation and evapotranspiration are predicted, but the monthly scale shows strong seasonal variability in trend. A strong redistribution of summer precipitation (- 24%) to winter precipitation (+ 18%) in average as well as more and longer precipitation-free periods is indicated until 2100. Intra-year redistribution from summer to winter is also found for evapotranspiration, because temporal and spatial distribution pattern is strongly linked to changes of precipitation.

In common growing season the change of climate will result in deterioration of water balance, calculated by subtracting precipitation from evapotranspiration, because of higher evapotranspiration rate. Therefore, a trend towards drier conditions and increased negative climatic water balance during this period can be determined. Furthermore, based on increasing trends in evapotranspiration and decreasing trends in precipitation, if occurring at the same time, an increase in water requirements for the vegetable crops can be expected. This water deficit may be compensated via additional irrigation in case of water availability. Besides, simulated durations of the growing season for both future periods will be extended due to an earlier start and later end. The importance and the consequences of time adjusted cultivation periods to changed growing season are discussed with respect to seasonal variability of rainfall, temperature change, agricultural activities, soil types and crop types.

While water availability is directly affected by climate change through changes in the major long-term climate variables such as precipitation and evapotranspiration, the relationship between changing climate, water availability and groundwater recharge suggests that there will be an effect on water resources. As a consequence, irrigation efficiency will become increasingly important in order to enable vegetable production in the field.

The climate change impact on nitrate leaching was analyzed with lysimeter experiments (2011, 2012 and 2013) using the simulated reallocation of precipitation of 10, 20 and 40% from summer to winter, respectively. The experiments resulted in a rising amount of percolating water combined with higher nitrate discharge the more precipitation was redistributed. The amount of percolating water increased up to a maximum of 55 to 77 mm compared to control. Likewise, the exchange capacity increased with rising redistribution of precipitation: from 2.1 to 2.7 of the control up to 2.7 to 3.5 of the -40% precipitation variant. Hence, the associated exported nitrogen quantities increased as well and were highest with greatest redistributed rainfall.

2. Zusammenfassung

Das Hessische Ried ist eine wichtige landwirtschaftliche Anbauregion in Hessen, wobei der Freilandgemüseanbau einen überdurchschnittlichen Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmacht. Die Tatsache, dass der Gemüsebau mit zu den größten Wasserkonsumenten gehört, verdeutlicht die Anfälligkeit des Gemüsebaus hinsichtlich klimawandelbedingter Veränderungen der Wasserverfügbarkeit. Verstärkend wirkt die geringe Toleranz von Gemüsekulturen gegenüber Wasserdefizit. Denn im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Kulturen führt Wassermangel bei Gemüsekulturen rasch zum Totalausfall der Ernte, da diese nicht mehr zu vermarkten ist. Der hohe Bewässerungsbedarf ist mit einer erhöhten Nitratauswaschungsgefährdung verbunden. Eine Reduzierung dieser steht im Fokus der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) und der Nitratrichtlinie. Die betrachteten Klimaprojektionen zeigen, dass die Anforderungen an den Gemüsebau hinsichtlich Wasserversorgung und Vermeidung von Nitrataustrag weiter zunehmen werden. Für die Region Hessisches Ried wurde deshalb eine Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs durchgeführt, um sowohl kultur- als auch standortspezifisch die Berechnungsmengen und ihre zeitliche Verfügbarkeit abschätzen zu können. Hierbei wurde der Fokus auf die regional bedeutsamsten Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel gelegt.

Die Klimaprojektionen basierten auf den Regionalisierungsmodellen WETTREG 2010, REMO und C-CLM, die durch zwei verschiedene Globalmodelle angetrieben wurden (ECHAM5 sowie HadCM3); dabei wurde das Szenario A1B zugrunde gelegt. Die Analyse der Niederschlagscharakteristika zeigte für alle verwendeten Kombinationen aus den Regionalisierungs- und Globalmodellen eine starke Umverteilung der Niederschläge vom Sommer (bis zu -24%) hin zum Winter (bis zu +18%). In allen Projektionen ergaben sich höhere Häufigkeiten und eine zeitliche Verlängerung von niederschlagsfreien Perioden innerhalb der Vegetationsperioden.

Die zukünftige kulturspezifische klimatische Wasserbilanz basierte auf der Berechnung der (potentiellen) Evapotranspiration (ET_c) nach FAO 56 (Allen et al. 1998), unter Berücksichtigung von Entwicklungsstadien der Gemüsepflanzen (k_c Werte) und des Niederschlages. Im Vergleich zur Referenzperiode (1971 - 2000) nahmen für die Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 in allen vier Modellkombinationen die Evapotranspirationsraten zu. In Kombination mit dem Trend abnehmender Niederschläge führte dies zu einer stärker negativen klimatischen Wasserbilanz (KWB) und damit zu einer Zunahme der Wasserbedarfe in der gemüsebaulichen Produktion. Für Zwiebeln umfasst die zukünftige kulturspezifische KWB (30jähriges Mittel 2071 - 2100) einen Wertebereich von -94 bis -250 mm, für Buschbohne von -6 bis -80 mm und für Spargel von -40 bis -140 mm. Die großen Bandbreiten sind den unterschiedlichen Ausprägungen der Klimaprojektionen hinsichtlich der modellierten Niederschlagsverhältnissen geschuldet. Dies macht deutlich, dass nur die Verwendung von einer ausreichenden Anzahl möglicher Klimaprojektionen zu belastbaren Aussagen hinsichtlich Veränderungen des Wasserhaushaltes führen.

Die Kalkulation des Zusatzwasserbedarfs erfolgte unter Anwendung der Geisenheimer Steuerung (GS) (Kleber 2014). Der Zusatzwasserbedarf für Zwiebeln verschiebt sich von 74 bis 317 mm in 1971 - 2000 auf 140 bis 416 mm in 2071 - 2100, für Buschbohne von 7 bis 130 mm auf zukünftig 8 bis 172 mm und für Spargel von 0 bis 226 mm auf 10 bis 452 mm. Die Modellierungen der zukünftigen Zusatzwasserbedarfe ergeben ebenfalls große Spannbreiten. Deutlich wird jedoch, dass mit einem deutlichen Mehr an Zusatzwasser zu rechnen sein wird. Neben der Bewässerungsmenge nimmt auch die Anzahl der Einzelgaben für alle drei Kulturen zukünftig zu. Dies geht mit erhöhten Zeitbedarfen für die Wasserversorgung der Kulturen einher.

Die vorgefundenen Bandbreiten hinsichtlich der Wasserhaushaltsgrößen sowie das Auftreten signifikanter Trends erwiesen sich in erster Linie von dem regionalen Klimamodell und dem jeweils als Antrieb verwendeten globalen Klimamodell abhängig. Beispielsweise simulierte WETTREG 2010 generell signifikante Trends, aber eine geringe Bandbreite. REMO und C-CLM simulierten vergleichsweise

eine höhere Bandbreite, aber nur teilweise signifikante Trends. Bei Verwendung von C-CLM, angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3, ergaben sich je nach Antrieb unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Signifikanz. Die Verwendung von Ensembles (d.h. möglichst vieler Kombinationen aus Global- und Regionalmodellen), um belastbare Aussagen über eine mögliche zukünftige Entwicklung zu erhalten, ist daher dringend geboten.

Zur Abschätzung praktischer Konsequenzen aus dem Mehrbedarf an Beregnungsmenge und der Zunahme der Bewässerungshäufigkeit wurden die Bewässerungskosten für die Sommertrockenzwiebel, Buschbohne und Bleichspargel kalkuliert. Die Bewässerungskosten berücksichtigten sowohl die Bewässerungsmengen, die Anzahl aller Einzelgaben und die Bewässerungstechnik (Rohrberegnung und Tropfbewässerung). Auf Grundlage des simulierten Klimawandels kommt es zukünftig zu einem erhöhten Zusatzwasserbedarf und damit verbunden zu einer Erhöhung der Kosten für die Bewässerung. Dabei werden die Kosten für das Betreiben der Bewässerungsanlagen weniger durch die Mengen an Beregnungswasser, sondern durch die Maschinen- und Personalkosten geprägt. Eine automatisierte Bewässerungssteuerung würde somit Kosten und Personalaufwand für die Bewässerung deutlich reduzieren. Die Kostensteigerung verstärkt sich für Standorte mit geringer nFK durch die Notwendigkeit kleinerer und damit häufigerer Wassergaben. Ein zukünftig erhöhter Bedarf an Bewässerung kann zur Folge haben, dass mit der vorhandenen Bewässerungstechnik, wie bspw. mobilen Beregnungsanlagen, der gestiegene Bedarf einzelner Schläge nicht mehr effizient umgesetzt werden kann. Daraus lässt sich schließen, dass in einigen Fällen neben den Betriebskosten insbesondere hohe Investitionskosten für Neuanlagen zu erwarten sind.

Die Frage, ob der Zusatzwasserbedarf auch unter der Annahme veränderter Anbauzeiträume zunimmt, wurde mithilfe des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Phänologie beantwortet. Die simulierten thermischen Vegetationsperioden für die beiden Zukunftsperioden verlängerten sich signifikant im Vergleich zur Referenzperiode, wobei sowohl eine Verfrühung der Anbauperiode (Aussaat- und Pflanztermine bereits in den Wintermonaten) als auch ein späteres Kulturende zu verzeichnen war. Die zeitliche Adaptierung der Kulturführung auf die veränderten Vegetationsperioden machte sich überwiegend durch niedrigere kulturspezifische Wasserbedarfe aufgrund weniger negativer kulturspezifischer KWB bemerkbar. Hingegen wies eine zeitlich unveränderte Vegetationsperiode (März bis Oktober) eine zukünftig stärker negative kulturspezifische KWB und damit einen steigenden Wasserbedarf auf.

Die Wirkung der projizierten Umverteilung von Niederschlägen aus den Monaten Mai bis August in die Monate September bis April wurde im Rahmen eines Lysimeterversuchs untersucht. Im Vergleich zur Kontrolle, die die Niederschlagsverteilung von Mannheim der Jahre 1971 bis 2000 simuliert, wurden die Niederschläge in den Monaten Mai bis August um jeweils 10, 20 oder 40% reduziert. Die Bewässerungsmenge stieg in den drei Versuchsjahren um maximal 27 bis 48 mm bei verschiedenen Szenarien an. Die Sickerwasserbildung und die damit einhergehenden Nitratausträge traten im Wesentlichen ab Ende Oktober bis Anfang Mai der darauffolgenden Jahre auf. Während der Wachstumsphasen der Zwiebeln trat keine Sickerwasserbildung auf. Die Sickerwassermengen stiegen in den drei Versuchsjahren um maximal 55 bis 77 mm pro Jahr gegenüber der Kontrollvariante an. Gleichfalls stiegen die Austauschhäufigkeiten, und damit verbunden die Stickstoffausträge, gegenüber der Kontrollvariante an.

Unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Simulationsergebnisse kann die Konsequenz gezogen werden, dass mit dem potentiell zunehmenden Wasserbedarf und der Vulnerabilität in der Wasserversorgung einer effizienten, automatisierten Bewässerungstechnik und Bewässerungssteuerung zukünftig mehr Beachtung zukommen muss, um den Mehrbedarf an Bewässerungswasser arbeitstechnisch und kosteneffizient abzudecken. Die hohen Austauschraten, verbunden mit hohen Stickstoffverlusten, die durch die projizierten Niederschlagsumverteilungen noch gesteigert werden, sollten Anlass zu einem Überdenken der etablierten Düngergaben und Bewässerungsgaben sein.

Die Ergebnisse dieser Studien berücksichtigen nicht die Effekte erhöhter CO₂-Konzentration auf die pflanzliche Entwicklung sowie deren Wasser- und Stickstoffnutzungseffizienz. Auch ist die CO₂-Wirkung auf die mikrobielle Zönose im Boden und damit auf die Stickstoffumsetzung nicht berücksichtigt. Diese Prozesse sollten künftig bei Klimafolgenfolgen-Simulationen Berücksichtigung finden.

3. Einleitung

Der globale Klimawandel wird sich mit einem bis zum Ende des 21. Jahrhundert prognostizierten CO₂-Anstieg zwischen 421 und 936 ppm, einer Erhöhung der Temperatur um 0,3 bis 4,8 °C, einer jahreszeitlich und regional stark variierenden Niederschlagscharakteristik sowie einer Zunahme von Wetterextremen auf die pflanzliche Lebensmittelproduktion auswirken (IPCC 2014). Untersuchungen des Klimawandels und seiner Folgen in Hessen im Rahmen von INKLIM zeigen, dass diese Klimaentwicklungen des 21. Jahrhunderts den zukünftigen Anbau von Sonderkulturen in Hessen stark beeinflussen werden (Chmielewski 2013, Jacob 2005, Schultz et al. 2008, Berthold 2008). Während für den Obst- und Weinbau der Einfluss klimatischer Veränderungen untersucht wurde, fehlen diese Abschätzungen noch weitgehend für den hessischen Gemüsebau.

Der Gemüseanbau ist durch besonders hohe Anforderungen an eine optimale Wasser- und Nährstoffversorgung charakterisiert. Dies liegt u.a. an der – im Vergleich zu ackerbaulichen Kulturen – meist erheblich intensiveren Flächenbewirtschaftung, hohen Ertrags- und Qualitätsanforderungen und dadurch bedingt hohem Ressourcenbedarf und -einsatz. So ist der Anbau von Gemüse bereits unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen in der Modellregion Hessisches Ried nur durch Zusatzbewässerung möglich (Berthold 2008).

Das Hessische Ried ist die gemüsebaulich wichtigste Anbauregion Hessens. Der Flächenanteil für Gemüse erreicht ein Viertel an der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Besonders Spargel, Speisezwiebeln und Buschbohnen gehören zu den Hauptkulturen (Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden, 2015). Im Mittel werden für die Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen jährlich 70 L/m² Zusatzwasserbedarf benötigt. „Bei diesen Kulturen kann der zusätzliche Wasserbedarf bis zu 300 mm pro Jahr betragen. Es ergibt sich im Durchschnitt ein Bedarf von rund 18 Millionen Kubikmetern Grundwasser pro Jahr für die landwirtschaftliche Beregnung.“ (Wasserverband Hessisches Ried 2011). Eine Erhebung der Beregnungsmengen zu verschiedenen Zeiten sowie unter Berücksichtigung von sogenannten Trocken- und Nassjahren im Jahr 2008 hat bestätigt, dass unter den klimatischen Bedingungen im Hessischen Ried eine wirtschaftliche Gemüseproduktion schon jetzt nur durch Zusatzbewässerung möglich ist. Vor diesem Hintergrund zeichnet sich die Notwendigkeit ab, die klimawandelbedingten Änderungen des Wasserverbrauchs und des Zusatzwasserbedarfs zu untersuchen.

Bisherige Klimaprojektionen ergaben steigende Evapotranspirationsraten und stärker negativ werdende Wasserbilanzen für das Gemüseanbaug Gebiet Hessisches Ried, die erhöhte Zusatzwassergaben erforderlich werden lassen (Berthold 2008). Es wird eine durchschnittliche Zunahme an Bewässerungsbedarf pro Dekade um etwa 10 mm bis zum Jahre 2050 angenommen. Im Hessischen Ried wird dieser Bedarf aus dem Grundwasser abgedeckt (Berthold 2008).

Die Modellierung der regionalen Klimaänderungen im Hessischen Ried zielt auf die Projektion zukünftiger Grundwasserneubildung und Anforderungen an die Wasserwirtschaft ab (Berthold und Hergesell, 2005; Berthold 2008). So beinhaltet diese die Simulation der klimatischen Wasserbilanz auf Grundlage des Niederschlages und der potentiellen Evapotranspiration für die gesamte Beregnungssaison. Für eine exakte Abschätzung des Beregnungsbedarfs des Gemüseanbaus in der Region bedarf es einer Simulation der klimatischen Wasserbilanz auf kultur- und anbausatzspezifischer Ebene. Diese muss den Vegetationszeitraum berücksichtigen sowie die Anbauflächencharakteristik und kulturspezifische Eigenschaften der Pflanzenentwicklung integrieren. Dies ist Gegenstand vorliegender Studie.

Darüber hinaus sind in bisherigen Abschätzungen des Zusatzwasserbedarfs (Berthold 2008; Schmidt et al. 2013) mögliche temperaturbedingte Veränderungen des Kulturzeitraums nicht berücksichtigt. Mit einer potentiellen Verfrühung und Verlängerung der Vegetationszeit könnten längere Kulturperioden und damit eine Erhöhung der Anzahl an Anbausätzen pro Saison einhergehen. Ein Anstieg an Zusatzwasserbedarf könnte die Folge sein. Bereits für den Zeitraum von 1961 bis 2000 konnte anhand

der phänologischen Uhr Hessens eine jahreszeitliche Verschiebung der Pflanzenentwicklung abgelesen werden (HLNUG 2008b).

Dafür ist es erforderlich, den Einfluss des Klimawandels auf die Vegetationsperiode zu betrachten. In dieser Arbeit wird der Einfluss der Temperatur auf den Anbauzeitraum von Gemüse mit Hilfe der thermischen Vegetationsperiode analysiert. Die thermische Vegetationsperiode eines Jahres ist definiert als die Anzahl Tage zwischen Vegetationsbeginn (erstes Aufkommen einer Durchschnittstemperatur über 5°C) und Vegetationsende (erstes Aufkommen einer Durchschnittstemperatur unter 5°C im Winterhalbjahr). Die zukünftige Entwicklung des kulturspezifischen Wasserbedarfs für die drei Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel wurde mit vier Klimamodellen berechnet. Dabei werden sowohl die Veränderung der einzelnen Entwicklungsstadien und der kulturspezifischen klimatischen Wasserbilanz als auch der daraus resultierende Bewässerungsbedarf hinsichtlich Zusatzwassermenge und Anzahl der Einzelgaben betrachtet. Die Modellrechnungen werden sowohl ohne Verschiebung der Vegetationsperiode durchgeführt als auch mit Verschiebung der Vegetationsperiode.

Im engen Zusammenhang mit den klimawandelbedingten Veränderungen des Niederschlags, des pflanzlichen Wasserverbrauchs und der Bewässerung steht die kultur- und umweltgerechte Nährstoffversorgung, insbesondere mit Stickstoff. Gemüsekulturen haben einen hohen Nährstoffanspruch, was die Gefahr der Nitratauswaschung ins Grundwasser mit sich bringt. Insbesondere der Stickstoffaustrag von Gemüseflächen kann die Erhaltung und Verbesserung der Grundwasserqualität beeinträchtigen. Um der Grundwassergefährdung vorzubeugen, sind und werden gesetzliche Richtlinien zum Gewässerschutz (EU-WRRL, Nitratrichtlinie, etc.) in die gute fachliche Praxis der integrierten Pflanzenproduktion implementiert (vgl. Novellierung der Dünge-VO). Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Niederschlag, pflanzlichem Wasserverbrauch und Bewässerung und der Stickstoffdynamik in Pflanze und Boden nehmen regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die Gemüseproduktion auch Einfluss auf die Grundwasserqualität. In welchem Umfang sich die zukünftige Stickstoffbilanz von gemüsebaulich genutzten Flächen im Hessischen Ried mit ihren Aspekten der Netto-Stickstoff-Mineralisierung und Nitrat-Leaching entwickeln wird, und welche Maßnahmen der Düngung abgeleitet werden können, ist ein zweiter Schwerpunkt dieses Vorhabens.

In einem weiteren Projekt zu Klimafolgen für den Gemüsebau sind in Kooperation mit dem Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz Impaktmodellierungs- und Simulationsarbeiten zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserbedarf von Blumenkohl, Bundzwiebel, Möhre und Radies bis 2050 für die Vorderpfalz, eine gemüsebaulich genutzte Nachbarregion des Hessischen Rieds, durchgeführt worden (Schmidt, N., Zinkernagel, J., Weinheimer, S. 2013).

3.1. Projektziele

Für das Hessische Ried sollen Klimawandel-bedingte saisonale Anforderungen an den Gemüseanbau hinsichtlich Zusatzwasserbedarf, Düngung sowie Kulturverfahren ermittelt werden. Dafür ist der Einfluss der regionalen Klimaprojektionen für den Gemüseanbau im Hessischen Ried hinsichtlich Wasser- und Stickstoffhaushalt zu analysieren. Es gilt kulturspezifische Vulnerabilitäten für die Wasserdizite und Wasserbedarfe zu ermitteln. Daraus wird sich eine Ausarbeitung von ressourcen- und grundwasserschonenden Bewässerungs- und Düngungsanpassungsstrategien für das Hessische Ried ableiten lassen.

Zur Abschätzung der möglichen Bandbreite der künftig möglichen regionalen Klimaänderungen sollen sowohl statistische als auch dynamische Regionalmodelle ausgewertet werden: WETTREG (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode), REMO und C-CLM, angetrieben durch das globale Klimamodell ECHAM5 bzw. HadCM3 für das Szenario A1B. Die Simulationen umfassen den Zeitraum von 1970 bis 2100, wobei die Periode 1971 - 2000 die Referenzperiode darstellt.

Der Zusatzwasserbedarf (mm) und die Beregnungshäufigkeit in der Region soll mit Simulation der kulturspezifischen klimatischen Wasserbilanz unter Einbeziehung der Geisenheimer Steuerung für einzelne Gemüsekulturen geschätzt werden. Dabei wird differenziert zwischen konservativer Anbauperiode und früherem Kulturbeginn. Für letzteren muss die Simulation einer thermischen Vegetationsperiode unter Verwendung phänologischer Temperaturschwellen zugrunde liegen.

Zur Abschätzung der Auswirkungen Klimawandel-bedingter Umverteilung von Niederschlägen auf die Nitrataustragsgefährdung gemüsebaulich genutzter Flächen soll ein Bewässerungsversuch mit Zwiebeln in wägbaren Lysimeterbehältern durchgeführt werden. In diesen sind unter Anwendung zukünftiger Niederschlagsszenarien der Zusatzwasserbedarf, die Sickerwasserbildung und der Nitrataustrag bilanziert worden. Daraus sind Maßnahmen zur Düngung und Vermeidung des N-Austrags abzuleiten.

Das Projekt soll eine Bewertungsgrundlage für mögliche Veränderungen der Bewirtschaftungsweisen, die sich aus den veränderten klimatischen Verhältnissen ergeben werden, für die gemüsebaulich wichtige Anbauregion „Hessisches Ried“ liefern.

4. Daten und Methodik

Zur Abschätzung der gemüsebaulichen Ist-Situation im Hessischen Ried wird der aktuelle Umfang (Stand 2016) des Anbaus von Gemüsearten im Freiland hinsichtlich Fläche und Ertrag ausgewertet. Des Weiteren wird die nFK als wichtige Bodenkenngröße und entsprechende Flächenanteile dieser berücksichtigt (Agrarstatistik des Landes Hessen, Umweltatlas Hessen (Hessisches Statistisches Landesamt)). Anhand dieser Charakteristika sollen mögliche Klimawandelfolgen für den Gemüsebau in der Modellregion so repräsentativ wie möglich erarbeitet werden.

Dazu wird der saisonale Wasserbedarf über die klimatische Wasserbilanz kulturspezifisch erfolgen. Die Auswahl von drei Gemüsearten erfolgt auf Grundlage ihres Stellenwertes im Hessischen Ried. Zu den flächenmäßig wichtigsten Kulturen zählen Spargel, Zwiebel und Buschbohne, weshalb die Analysen auf jene fokussiert werden (siehe Kapitel 4.1.3).

4.1. Untersuchungsgebiet Hessisches Ried

4.1.1. Klima und Geologie im Hessischen Ried

Das Hessische Ried – gelegen in Südhessen und Zentrum des hessischen Gemüsebaus – ist Teil des nordöstlichen Abschnitts der Oberrheinischen Tiefebene. Es liegt zwischen Rhein und Bergstraße und erstreckt sich von Lampertheim im Süden bis hinauf nach Groß-Gerau und zum Frankfurter Flughafen im Norden. Es umfasst ein Gebiet von ca. 50 km Länge und 15 km Breite. Ursprünglich war das Hessische Ried Sumpfland. Erst die flächenhaften Entwässerungsmaßnahmen (System von Entwässerungsgräben) in den 30er Jahren schufen die Voraussetzungen für die heutige Kulturlandschaft bzw. die landwirtschaftliche Nutzung. Die im Hessischen Ried vorherrschenden Boden- und Klimabedingungen (oft stark sandhaltige Böden und durchschnittliche Tagesmitteltemperatur über 10°C) erwiesen sich als äußerst günstig für eine intensive landwirtschaftliche und vielseitige gartenbauliche Nutzung, deren Fläche in den letzten Jahren kontinuierlich ausgeweitet wurde. Im Zuge dessen stiegen der Anteil an bewässerten Flächen, der Wasserverbrauch und die Anforderungen an die Wasserbereitstellung aus Brunnen und Gewässern.

Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Bewässerungsbedarf ausgewählter Gemüsearten im Hessischen Ried abschätzen zu können, ist eine Modellierung von klimatischen Wasserbilanzen, die einen kultur- und flächenspezifischen Bezug aufweisen, notwendig. Die klimatische Wasserbilanz errechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und Verdunstung.

Der flächenspezifische Bezug ergibt sich durch die Bodenart, welche einen großen Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt hat. Im Hessischen Ried liegen sehr heterogene Bodenverhältnisse vor (Abbildung 1).

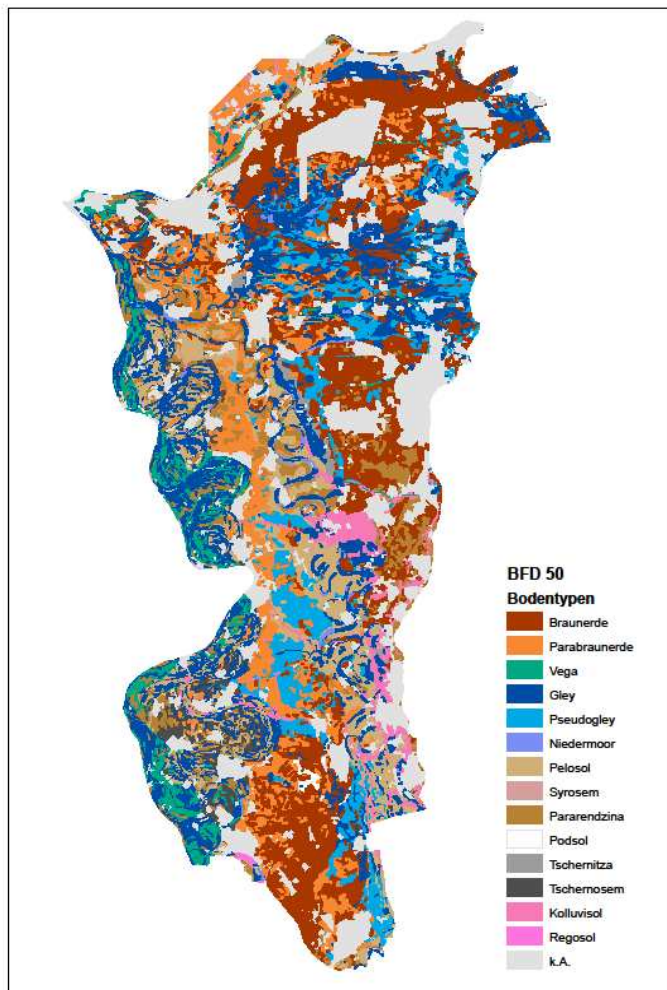


Abbildung 1: Bodenkarte der BFD 50 Bodentypen für das Hessische Ried (Bodenviewer, HLNUG 2016)

Der kulturspezifische Bezug resultiert aus der Betrachtung des Kultursortiments. Daher sind neben den meteorologischen Zielgrößen noch Bodenkenngößen und Anbauverhältnisse zu berücksichtigen.

Für eine Charakterisierung des Hessischen Rieds als Modellregion wurden die Anbau- sowie Bodenverhältnisse ausgewertet, sodass für das Hessische Ried typische Anbau- und Bodenverhältnisse in die Berechnungen des Bewässerungsbedarfs integriert werden können. Hierzu werden exemplarisch die Landnutzung, Bodenkenngößen (bspw. nFK) und die Anbauverhältnisse betrachtet.

4.1.2. Pflanzenverfügbare Wassergehalt von Böden im Hessischen Ried

Die Kenntnis über vorherrschende Böden und deren hydrologische Eigenschaften ist notwendig, um den Zusatzwasserbedarf zu kalkulieren. In Bezug auf den Wasserhaushalt sind primär die Bodenkenngößen **Feldkapazität (FK)** und **nutzbare Feldkapazität (nFK)** von Bedeutung, wobei aus pflanzenbaulicher Sicht die nFK entscheidend ist. Die FK ist jene Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Die nFK ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation nutzbar ist und damit das wesentlich Maß für die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge (Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, Seite 302 bis 304, 1994). Diese Bodenkenngößen sind von der Bodenart und der Bodendichte abhängig und werden in Volumenprozent oder mm durchwurzelter Bodenraum angegeben. Sie müssen für jeden Standort ermittelt werden. Richtwerte für Bodenkenngößen im Zusammenhang mit Bodenart und Bodentiefe sind für das Hessische Ried aus Ergebnissen der Bo-

denschätzung bekannt (HLUG, 2008a). Daraus geht hervor, wieviel Wasser in Vol% und in mm ein Boden für pflanzenbauliche Zwecke halten kann (Tab. 1). Leichte Böden weisen ein geringes Wasserhaltevermögen und somit wenig pflanzenverfügbares Bodenwasser auf. Für die Bewässerung von Gemüsekulturen in Abhängigkeit der Durchwurzelungstiefe resultiert daraus eine kleine und häufige Einzelwassergabe von bspw. 5 bis 10 mm. Sobald der Schluff- und Tonanteil der Böden zunimmt, steigt das Wasserhaltevermögen bei Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität und Totwasser an. Bei Lehm bis hin zu tonigen Böden ist das Wasserhaltevermögen nochmals deutlich erhöht. Die Einzelwassergabe kann hier für tiefwurzelnende Kulturen 30 mm erreichen.

Tabelle 1: Richtwerte für die nutzbare Feldkapazität (nFK), den Totwasseranteil (TW) und die Feldkapazität (FK) in Abhängigkeit der Bodenverhältnisse (HLNUG, 2008a)

Bodenverhältnisse	nFK		TW		FK	
	Vol.-%	mm (60 cm Bodentiefe)	Vol.-%	mm (60 cm Bodentiefe)	Vol.-%	mm (60 cm Bodentiefe)
Sand (S)	9	54	2.5	15	11.5	69
anlehmiger Sand (SI)	13	78	6	36	19	114
Lehmiger Sand (IS)	15	90	10	60	25	150
Stark lehm. Sand (SL)	19	114	15	90	34	204
Sandiger Lehm (sL)	20	120	17	102	37	222
Lehm (L)	23	138	23	138	46	276
Schwerer Lehm (LT)	17	102	26	156	43	258
Ton (T)	15	90	34	204	49	294
Schluff (U)	24	144	11	66	35	210

Im Hessischen Ried liegen größtenteils sandig bis lehmige Böden vor. Vorrangig sind folgende Bodenklassen vertreten: Sand bis sandiger Lehm, Sand bis lehmiger Sand, Schluff-sandiger Lehm bis sandig-toniger Lehm, Lehmiger Schluff bis sandig-toniger Lehm, sand-lehmiger Schluff bis lehmiger Ton sowie Sand bis toniger Sand. Es finden sich also überwiegend Böden, die ein geringes Wasserhaltevermögen besitzen.

Ausgehend von den vorliegenden Bodenverhältnissen lassen sich die nFK der Bodenhorizonte 0 - 30cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm bestimmen. Die angetroffenen Größenordnungen der nFK für die Ackerböden im Hessischen Ried (Abb. 2, HLNUG 2011) entsprechen der räumlichen Verteilung der Bodenarten, aus denen die nFK-Gehalte abgeleitet wurden. Die sog. „Riedsande“ bspw. machen sich deutlich durch geringere nFK-Gehalte bemerkbar. Mit der Aggregation der Bodendaten auf Gemeindeebene geht eine Nivellierung der nFK-Werte einher. Dies bedingt bei der weiteren Verrechnung der Daten eine gewisse Unschärfe.

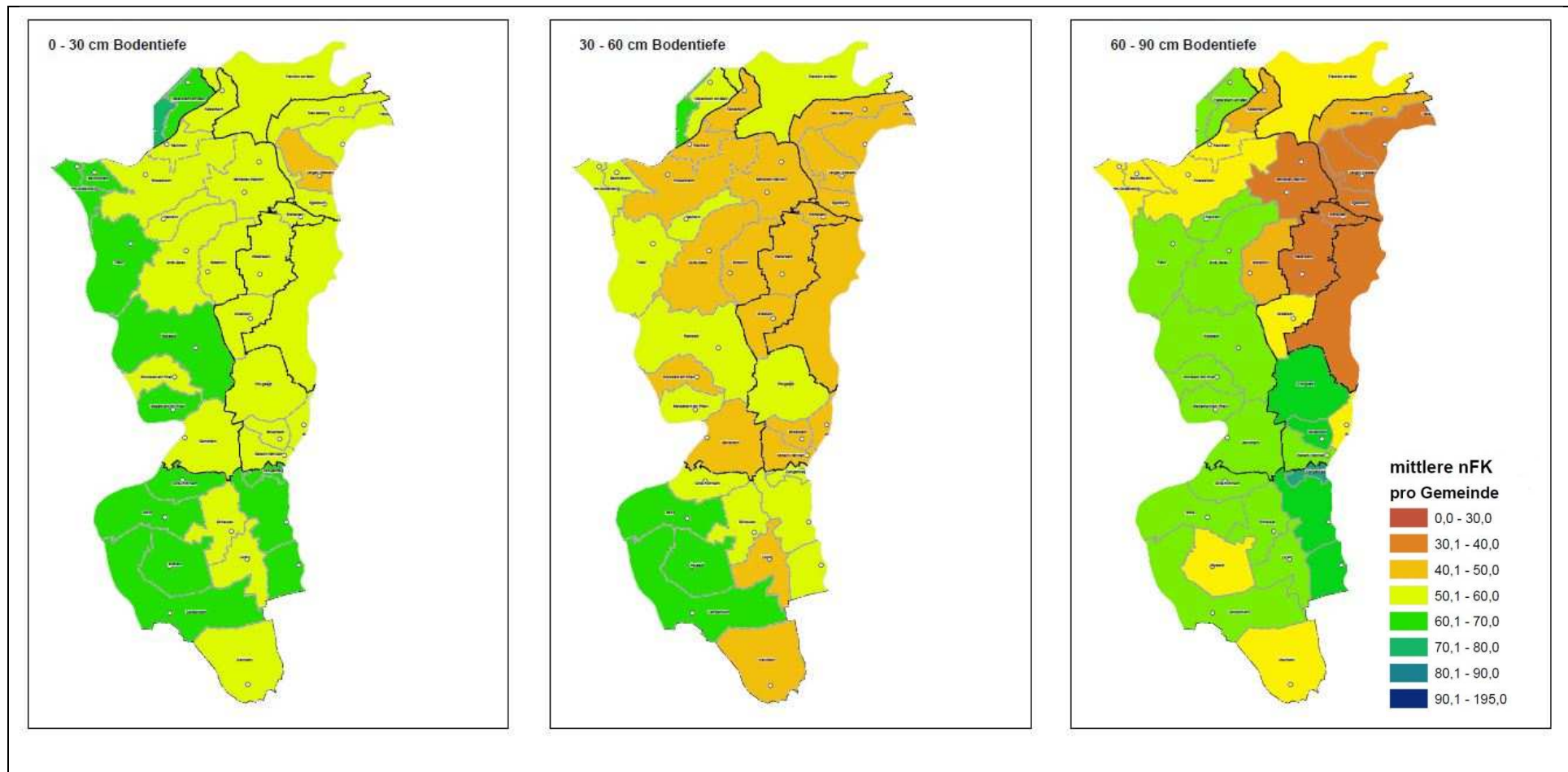


Abbildung 2: Pflanzenverfügbare Wassergehalt von Ackerböden im Hessischen Ried - mittlere nutzbare Feldkapazität pro Gemeinde [in mm je 30 cm Bodenschicht] (HLNUG 2011)

Für das Hessische Ried ist im Horizont 0 - 30 cm eine nFK von 50 - 70 mm am häufigsten vertreten (Abb. 2, HLNUG 2011). Diese Bodenschicht korrespondiert häufig mit der Durchwurzelungstiefe von Sä- und Pflanzkulturen in der Anwachsphase, sowie für Flachwurzler bis zur Ernte. Diese mittlere Wasserhaltefähigkeit begründet die hohe Bewässerungswürdigkeit von Gemüsekulturen im Ried. In 30 - 60 cm Bodentiefe sind geringere nFK-Werte von 40 - 50 mm zu finden. Mit dem Haltevermögen für Wasser geht auch jenes für Nährstoffe einher. Zur Vermeidung von Wassermangel, aber auch Bewässerungsüberschüssen und damit hohen Nitratausträgen ist eine bedarfsgerechte Bewässerung erforderlich. Die nFK-Werte der entsprechenden Durchwurzelungstiefe von Spargel, Buschbohne und Zwiebel werden in der Kalkulation des kulturspezifischen Wasserbedarfs und der Bewässerung berücksichtigt.

4.1.3. Gemüseanbau im Hessischen Ried

Für den kulturspezifischen Charakter der Modellierung müssen die realen Anbauverhältnisse berücksichtigt werden. Im Jahr 2015 betrug die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Hessen 769.500 ha. Damit lag der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche bei 37%. Hessisches Freilandgemüse wurde auf ca. 6.877 ha angebaut. Die zehn wichtigsten Freilandkulturen im Hessischen Anbau sind hinsichtlich ihrer Anbaufläche, des Ertrags und der Erntemenge gegenübergestellt, wobei „nicht im Ertrag stehender Spargel“ nicht berücksichtigt wurde (Tabelle 2). Dabei nehmen die im Rahmen des Projektes bearbeiteten Kulturen Spargel 26% (1.780 ha), Zwiebel 19% (1.334 ha) und Buschbohne ca. 8% (559 ha) der Gemüseanbaufläche ein (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015). Demnach werden weit über 50% der gemüsebaulich genutzten Fläche für den Anbau dieser Gemüsekulturen genutzt.

Tabelle 2: Anbau, Ertrag und Ernte ausgewählter Gemüsearten im Freiland in Hessen 2015

* ohne „nicht im Ertrag stehenden Spargel“

Gemüseart *	Anbaufläche [ha]	Ertrag [dt/ha]	Erntemenge [t]
Spargel	1.780	57	10.095
Speisezwiebel	1.334	479	63.855
Buschbohnen	559	81	4.502
Weißkohl	490	730	35.728
Zuckermais	338	166	5.592
Möhren / Karotten	218	513	11.203
Spinat	155	194	3.022
Speisekürbisse	156	179	2.788
Rotkohl	137	506	6.960
Porree (Lauch)	94	313	2.930

Regional betrachtet liegt der Schwerpunkt des Gemüseanbaus im Hessischen Ried in den Landkreisen Bergstraße, Darmstadt-Dieburg und Groß-Gerau, weshalb diese repräsentativ für die Auswertung herangezogen werden. Im Jahr 2015 lagen 2.003 ha der Gemüseanbaufläche im Landkreis Bergstraße, 1.480 ha in Darmstadt-Dieburg sowie 1.644 ha im Landkreis Groß-Gerau. Somit lagen ca. 5.100 ha Gemüseanbaufläche im Hessischen Ried, was einen Anteil von 75% an der gesamt hessischen Gemüseanbaufläche ausmacht. Im Landkreis Groß-Gerau dominieren Speisezwiebel mit anteilig 48% (463 ha), gefolgt vom Spargel mit 34% (334 ha) die Anbauverhältnisse. Im Landkreis Darmstadt-

Dieburg beherrscht der Spargelanbau mit 75% (759 ha) den Gemüseanbau und im Landkreis Bergstraße bestimmen Speisezwiebel mit 45% (811 ha), gefolgt von Buschbohne mit 26% (469 ha) und Spargel mit 17% (306 ha) den Gemüseanbau (siehe Anhang Abbildung A 1 bis Abbildung A 3).

4.1.4. Bewässerung im Hessischen Ried

Heutzutage beträgt die erschlossene Beregnungsfläche ca. 33.000 ha, welche in etwa 96% der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmacht. Davon kann auf 28.000 ha der Zusatzwasserbedarf in Form von Beregnungsbrunnen auf den Feldern direkt aus dem Grundwasser abgedeckt werden. Ungefähr 5.000 ha werden mit aufbereitetem Rheinwasser und nur 91 ha durch aufbereitetes Oberflächenwasser versorgt. Gemüsebauliche Kulturen wie bspw. Spargel machen anteilig 5% oder Zwiebelgewächse 14% der Beregnungsfläche im Hessischen Ried aus (Berthold 2008).

Laut einer Befragung von Landwirten ist ein Großteil der potenziellen Beregnungsflächen (85%) durch eine bewegliche Maschinenberegnung (i. d. R. Regnereinzug), 12% durch Reihenbewässerungsanlagen und ca. 3% durch ortsfeste Beregnungsanlagen (bspw. Tropfbewässerung) erschlossen. Der Zeitraum der Beregnungssaison erstreckt sich parallel zur Vegetationsperiode von Ende März bis Ende September bzw. Anfang Oktober (Berthold 2008).

Im Landkreis Bergstraße hatten in 2009 insgesamt 150 Betriebe die Möglichkeit eine Fläche von 8985 ha zu bewässern. Davon haben tatsächlich 124 Betriebe eine Fläche von 4889 ha mit einer Wassermenge von 5.008.000 m³ bewässert, überwiegend durch Sprinkleranlagen. Anteilig bauten 50 Betriebe Gemüse im Freiland an und bewässerten eine Fläche von 1705 ha. Der Hauptanteil des Beregnungswassers, nämlich 4.480.000 m³, stammte aus dem Grundwasser.

In Darmstadt-Dieburg bestand die Möglichkeit zur Bewässerung für insgesamt 154 Betriebe auf einer Fläche von 5921 ha. Faktisch bewässert wurde allerdings eine Fläche von 2919 ha durch 121 Betriebe, wovon 68 Betriebe und 1368 ha bewässerte Fläche für den Anbau von Gemüse im Freiland anfallen. Die verbrauchte Wassermenge betrug 3 180 000 m³. Die Mehrheit der Betriebe bezog den Hauptanteil des Beregnungswassers zum einen aus dem Grundwasser (65 Betriebe, 1.828.000 m³) und zum anderen aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen (43 Betriebe, 1.260.000 m³). Vorwiegend kamen auch hier Sprinkleranlagen zum Einsatz.

In Groß-Gerau besaßen 2009 insgesamt 276 Betriebe die Möglichkeit zur Bewässerung einer Fläche von etwa 13.079 ha. Real bewässert wurde jedoch eine Fläche von 6293 ha durch 246 Betriebe. Der Anteil für den Anbau von Gemüse im Freiland betrug 102 Betriebe und 1430 ha bewässerte Fläche. Für die Bewässerung wurden 4.410.000 m³ Wasser verbraucht, welches, wie auch in den anderen Landkreisen, überwiegend aus dem Grundwasser stammt (188 Betriebe, 2.798.000 m³) und in erster Linie ebenfalls durch Sprinkleranlagen ausgebracht wurde.

Damit entfielen im Jahr 2009 auf die drei oben genannten Landkreise mit 12.598.000 m³ annähernd 90% der vom Statistischen Landesamt Hessen erfassten, insgesamt verbrauchten Zusatzwassermengen für ganz Hessen (siehe Anhang Tab. A3). Die resultierenden Zusatzwassermengen berechnen sich aus der statistischen Erhebung für die Beregnungsflächen im Kreis Bergstraße mit 102 L/m², für Kreis Darmstadt-Dieburg mit 108 L/m² sowie für die Beregnungsflächen im Kreis Groß-Gerau mit rund 70 L/m².

4.2. Datengrundlage

Um die Auswirkungen des Klimawandels und die damit verbundenen Veränderungen des Bewässerungsmanagements und des Zusatzwasserbedarfs für Gemüsekulturen aufzuzeigen, bedarf es neben der Erfassung der Anbauverhältnisse und Bodenkenngößen auch einer Projektion möglicher Entwicklungen des regionalen Klimas.

Dies soll durch Simulationen mit den Regionalisierungsmodellen WETTREG 2010, REMO und C-CLM erreicht werden. Die Simulationen mit den Zeitreihen der Regionalisierungsmodellen sollen durch zwei verschiedene Globalmodelle angetrieben werden: ECHAM5 sowie HadCM3. Daraus ergeben sich insgesamt vier Modellkombinationen: C-CLM (HadCM3), C-CLM (ECHAM5), REMO (ECHAM5) sowie WETTREG 2010 (ECHAM5).

Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hat verschiedene Szenarien für die zukünftige weltweite sozioökonomische Entwicklung ausgearbeitet. Mit den Treibhausgas (THG)-Emissionen der Szenarien (siehe IPCC-Bericht) wird berechnet, wieviel CO₂ in Pflanzen oder im Ozean gespeichert wird und wieviel in der Atmosphäre verbleibt und somit zur THG-Konzentration in der Atmosphäre beiträgt. Die Konzentrationen weiterer THG (z. B. Methan, Lachgas) werden ebenfalls berücksichtigt, indem sie entsprechend ihrer Klimawirksamkeit in einen äquivalenten Wert für CO₂ umgerechnet und hinzuaddiert werden. Mit der resultierenden Entwicklung der THG-Konzentration in der Luft werden dann Klimamodelle angetrieben. Ein globales Klimamodell ist ein Computerprogramm, das das Klimasystem der Erde (also Luft, Erdboden, Ozeane, Eisflächen usw.) mit physikalischen Gleichungen beschreibt. So werden Temperatur, Wind, Sonnenschein und weitere Eigenschaften des Klimas simuliert. Die beschriebenen globalen Klimamodelle simulieren die Erde in Gitterboxen mit einer Seitenlänge von ca. 100 bis 300 km. Das ist natürlich viel zu grob, um das Klima von Hessen darzustellen. Deshalb werden sogenannte regionale Klimamodelle eingesetzt. Diese berechnen die Klimaänderung nur für einen Ausschnitt der Erde, dafür aber mit höherer Auflösung. In den dynamischen regionalen Klimamodellen wird dieselbe Methodik verwendet wie in den globalen Modellen, jedoch nur für einen Ausschnitt des Globus. In den statistischen regionalen Klimamodellen wird der statistische Zusammenhang zwischen Beobachtungen an Wetter- oder Klimastationen und der globalen Zirkulation der Atmosphäre ausgewertet. Dieser Zusammenhang wird in die Zukunft übertragen und liefert Ergebnisse für die Punkte, an denen die Beobachtungsstationen stehen (Quelle: Broschüre Klimawandel in der Zukunft, HLNUG, Fachzentrum Klimawandel Hessen, 2015).

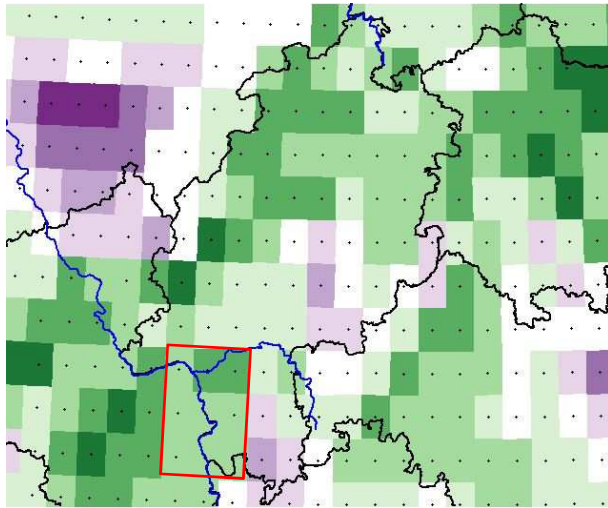
Für die Simulationen wird das Szenario A1B zugrunde gelegt. Dieses wird hinsichtlich der Entwicklung von THG als moderat angesehen. Dieses Szenario geht von einer weiter steigenden Treibhausgaskonzentration, einem raschen Wirtschaftswachstum, einem Weltbevölkerungsmaximum in der Mitte des 21. Jahrhunderts sowie einer schnellen Einführung von neuen, effizienten Technologien zur Minderung des THG-Ausstoßes aus.

Die Daten wurden zusammen mit dem „Interaktiven Diagnose- und Präsentationstool“ (kurz IDP) vom HLNUG für die Auswertung zur Verfügung gestellt. Dieses Programm ermöglicht neben einer grafischen Visualisierung verschiedener Auswertaspekte auch das Auslesen der Daten, um sie für weitere Berechnungen im Rahmen der Impactforschung zu verarbeiten.

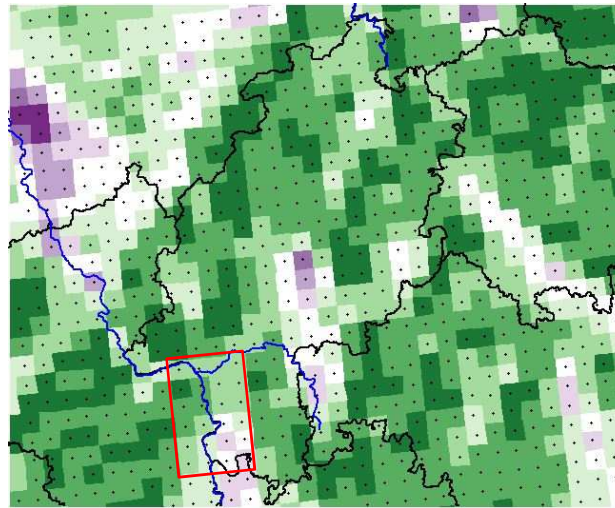
Bei den Regionalisierungsmodellen gilt zu beachten, dass diese in unterschiedlichen räumlichen Strukturen vorliegen. Während bei REMO und C-CLM Gitterboxen vorliegen, beruhen die Daten im Fall von WETTREG 2010 auf Stationen. Das Hessische Ried ist allerdings in der Fläche zu betrachten. Um die Vergleichbarkeit der Modelle trotz ihrer unterschiedlichen Datengrundlage zu gewährleisten, wurde zur „Abbildung“ des Hessischen Rieds in den Simulationen daher eine Auswahl von repräsentativen Stationen bzw. Gitterpunkten der Region als Datengrundlage getroffen, die denselben Flächenausschnitt abbilden.

Für die Auswahl der jeweiligen Gitterpunkte bzw. Stationen wurden Karten in IDP erzeugt (s. Abb.3). Es wurden die Gitterpunkte für REMO und C-CLM ausgewählt, die die Fläche der Modellregion „Hessisches Ried“ abdecken. Mit Hilfe des so erzeugten Flächenausschnitts konnte die Gebietsabgrenzung für WETTREG 2010 übernommen werden und somit die Auswahl der Stationen erfolgen, die eine Deckungsgleichheit gewährleisten (vgl. Tab. A4). Es gilt zu berücksichtigen, dass der so erzeugte Flächenausschnitt die reale Region „Hessisches Ried“ nicht gänzlich abdeckt.

a) C-CLM



b) REMO



c) WETTREG 2010

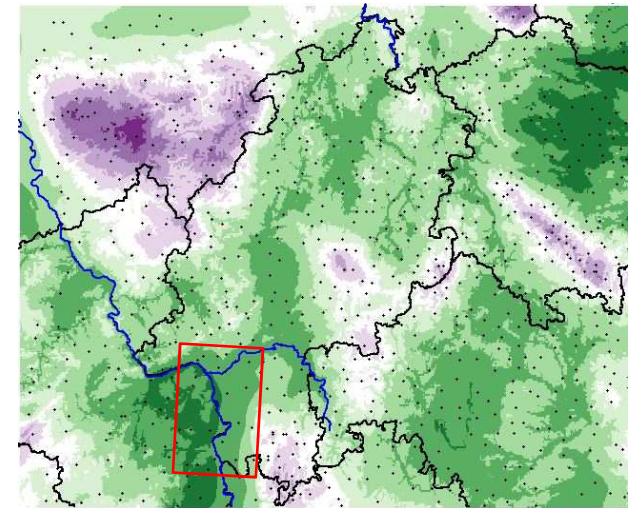


Abbildung 3: IDP - Karten [exemplarisch] für die Zuordnung der Gitterpunkte bzw. Stationen, die die Modellregion „Hessisches Ried“ in der Fläche abdecken für a) C-CLM, b) REMO und c) WETTREG 2010 jeweils angetrieben durch ECHAM5 am Beispiel für den Niederschlag im meteorologischen Jahr für den Zeitraum 1971 - 2000 (Farbskala: Niederschlag < 500 mm grün bis > 1000 mm Purpur). Die rote Markierung stellt die Modellregion Hessisches Ried dar.

4.2.1. Daten der dynamischen regionalen Klimamodelle

Bei dynamischen regionalen Klimamodellen handelt es sich um 3-dimensionale atmosphärische Zirkulationsmodelle, in denen alle relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet werden. Die räumliche Auflösung dieser regionalen Klimamodelle liegt zwischen sieben und 50 km. Durch die hohe Auflösung liefern diese Modelle Klimainformationen auf Mesoskalen-Ebene, da sie die regionalen Besonderheiten besser repräsentieren. Allerdings benötigen diese Modelle an den seitlichen Gitterrändern des Modellgebietes zusätzliche Informationen über die großräumige Zirkulation. Das heißt, es wird ein so genannter Antrieb benötigt, welcher von einem globalen Klimamodell zur Verfügung gestellt werden kann. Zwei der im Projekt verwendeten regionalen Klimamodelle (C-CLM und REMO) sind dynamische regionale Klimamodelle.

Das regionale Klimamodell C-CLM (Cosmo Climate version of Local Model) ist das auf einem gemeinsamen Programmcode basierende Wettervorhersage- und Klimamodell des DWD (Deutscher Wetterdienst). Das regionale Modell REMO ist eine Weiterentwicklung des zur Wettervorhersage verwendeten *Europa Modells* (EM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) (Jacob et al. 2001, Jacob et al. 2007).

Beide Modelle ähneln sich stark hinsichtlich ihrer Modellstruktur, da sie hydro- und thermodynamische Grundgleichungen verwenden. Während C-CLM jedoch ein nicht-hydrostatisches Modell ist, ist REMO ein hydrostatisches Modell. Die Klimaprojektionen von C-CLM umfassen den Zeitraum von 1961 bis 2100 und von REMO 1951 bis 2100. Die räumliche Auflösung liegt bei C-CLM bei ungefähr 18 km sowie 10 km für REMO. Beide Regionalmodelle werden durch das Globalmodell ECHAM5 (Roeckner et al. 2003 und 2004) angetrieben, das Regionalmodell C-CLM zusätzlich noch mit dem Globalmodell HadCM3 des Hadley Centre. Einen Überblick über die Daten dieser Modelle, die für das Projekt zur Verfügung standen, sind im Anhang (Tabelle A 5) dargestellt.

4.2.2. Daten des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG 2010

Statistische regionale Klimamodelle basieren auf der Analyse statistischer Zusammenhänge zwischen dem lokalen Wettergeschehen und den beobachteten, großskaligen atmosphärischen Strukturen. Es wird angenommen, dass diese Zusammenhänge auch zukünftig gelten, sodass die Ursachen für lokale Klimaänderungen in sich ändernden Häufigkeiten und Intensitäten großräumiger meteorologischer Strukturen zu suchen ist. WETTREG 2010 (WETTERlagenbasierte REGionalisierungsmethode) wurde von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) entwickelt und ist ein so genanntes statistisches regionales Klimamodell, dessen Daten nicht auf einem Raster, sondern auf Stationen beruhen. Als Antrieb wird das Globalmodell ECHAM5 genutzt. Hierbei werden statistische Zusammenhänge zwischen globalen und lokalen Klimavariablen hergestellt. Die Klimaprojektionen umfassen den Zeitraum 1951 bis 2100 und basieren deutschlandweit auf insgesamt 398 Klimastationen und 3012 Niederschlagsstationen. Da statistische regionale Klimamodelle deutlich weniger Rechenzeit als dynamische benötigen, besteht hier die Möglichkeit mehrere Realisationen zu berechnen. Dadurch werden unterschiedliche Entwicklungen des Klimas in der Zukunft abgebildet. Von WETTREG 2010 standen zehn Realisationen zur Verfügung.

Für die Auswertungen wurde bei WETTREG 2010, zusätzlich zur Mittelwertbildung über die Stationen (Flächenmittel) und die Zeiträume (30jähriges Mittel), noch der Mittelwert über die zehn Realisationen hinweg gebildet. Die für WETTREG 2010 verfügbaren Klimaparameter sind dem Anhang zu entnehmen (Tabelle A 6).

4.2.3. Einschränkungen

In Hinblick auf die verfügbaren Modelldaten sind einige Einschränkungen zu berücksichtigen, die hier kurz beschrieben werden sollen.

Es gibt Unterschiede bezüglich des verfügbaren Datenzeitraums bei C-CLM, angetrieben durch HadCM3, im Gegensatz zu den anderen Modellkombinationen. Allgemein ist der erste Tag im Datensatz zwar der 01.01. des jeweiligen Jahres, aber brauchbare Daten lagen erst ab dem 03. Januar vor. Ebenso verhält es sich mit dem Jahresende. Die Datumsskala geht zwar bis zum 31.12 des jeweiligen Jahres, Daten waren aber maximal bis zum 27. bzw. 28.12 verfügbar. Die Datenverfügbarkeit war insgesamt bis Ende November 2099 begrenzt.

Da für die Bearbeitung dieses Projektes eine eigene Berechnung der Evapotranspiration nach FAO 56 (Allen *et al.* 1998) vorgesehen war, wurde für das Modell REMO eine direkte Abfrage der Daten vom DWD-Server durchgeführt, um die benötigten Globalstrahlungswerte zu erhalten. Dabei wurde berücksichtigt, dass zum einen der gleiche Lauf ausgewählt wurde und die Gitterpunkte denselben geografischen Ausschnitt für das Hessische Ried abdecken wie die anderen Modelle.

Auch bei WETTREG 2010 sind einige Einschränkungen zu berücksichtigen. Diese betreffen jedoch weniger die Daten an sich, sondern deren Verfügbarkeit. Ein wesentlicher Faktor für die Auswertung des zukünftigen kulturspezifischen Wasserbedarfs ist die Berechnung der Evapotranspiration. Für die Berechnung der Verdunstung sind aber mehrere klimatische Parameter wie bspw. Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchte usw. notwendig. Ein Großteil der Stationen, die das Gebiet „Hessisches Ried“ abdecken, sind allerdings keine Klimastationen, sodass nur Niederschlagsdaten verfügbar sind. Von den insgesamt 20 verfügbaren Stationen des Modells WETTREG2010 für das Hessische Ried sind nur fünf Klimastationen, und davon weisen nur drei die benötigten Daten auf.

Ausgehend von der Datenverfügbarkeit und den beschriebenen Einschränkungen ergeben sich für die Gebietsabbildung des Hessischen Rieds insgesamt jeweils neun Gitterpunkte bei C-CLM und 42 Gitterpunkte bei REMO sowie insgesamt 20 Stationen bei WETTREG 2010, von denen nur fünf Klimastationen sind und wiederum nur bei drei die erforderlichen Daten für eine Berechnung der Evapotranspiration vorliegen. Daher ging je nach Betrachtung eine unterschiedliche Anzahl an Stationen in die Auswertung ein. Für die Auswertungen bzgl. Niederschlagsverteilung sowie Länge niederschlagsfreier Zeiträume wurden die Daten von allen 20 Stationen in die Berechnungen einbezogen. Für alle weiteren Auswertungen wurden lediglich die 3 Klimastationen verwendet. In Tabelle A 4 (Anhang) sind die jeweiligen Gitterpunkte und Stationen nach Modellkombination sortiert und namentlich aufgeführt. Die drei regionalen Klimamodelle, die mit ECHAM5 angetrieben werden, verwenden denselben Modelllauf (Lauf 1).

4.3. Phänologie

Die pflanzliche Entwicklung unterliegt einem Zyklus, der durch den Witterungsverlauf im Jahr geprägt wird. Die anschaulichsten Reaktionen von Pflanzen bezüglich klimatischer Veränderungen sind Unterschiede in der phänologischen Entwicklung von Pflanzen. Dabei stellen die höheren Temperaturen, vor allem in den Frühlingsphasen, einen wesentlichen Einflussfaktor dar. Somit gewinnen phänologische Daten in der Klimafolgenforschung hinsichtlich Trendanalysen zunehmend an Bedeutung, da sich die Erscheinungsdaten phänologischer Phasen in Beziehung zu Temperaturtrends setzen lassen.

In der Fachwelt wird davon ausgegangen, dass sich im Zusammenhang mit dem Klimawandel die thermische Vegetationsperiode zeitlich verschiebt (Shen *et al.* 2012, Sparks *et al.* 2009, Carter 2008, Linderholm 2006, Schwartz *et al.* 2006). Generell wird der Zeitraum als thermische Vegetationsperiode definiert, in dem die Tagesmitteltemperatur 5°C überschreitet, da unter diesen Bedingungen für die meisten Pflanzen Wachstum möglich ist (Chmielewski 2007). Dies ist insofern von Bedeutung, da besonders die Temperatur als Wachstumsfaktor eine wichtige Rolle spielt. Die einzelnen Entwicklungsstadien der Kulturen unterliegen hinsichtlich ihres Eintretens und ihrer Dauer dem Einfluss der Temperatur. Damit besteht also auch für das Wachstum der Pflanzen eine Abhängigkeit zum Klimawandel, da von einer Veränderung der Temperaturen über einen längeren Zeitraum ausgegangen wird.

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Anbauzeitraum von Gemüse in der Zukunft können daher mithilfe der so genannten „thermischen Vegetationsperiode“ beschrieben werden (Chmielewski 2007).

4.3.1. Thermische Vegetationsperiode

Für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturen, sowohl hinsichtlich Bewirtschaftungszeitraum sowie -maßnahmen als auch Entwicklung, ist die Länge der Vegetationsperiode ausschlaggebend. Da die Vegetationsperiode durch klimatische Einflüsse geprägt wird, ist insbesondere im Zusammenhang mit dem Thema Klimawandel immer auch eine Verschiebung von Vegetationsbeginn und -ende diskutiert.

Der für den Gemüseanbau relevante Anbauzeitraum wird durch die **thermische Vegetationsperiode** festgelegt. Abgesehen vom Überschreiten der definierten 5°C Temperaturschwelle für den Vegetationsbeginn ist es für das Pflanzenwachstum außerdem wichtig, dass im Anschluss daran ein bestimmter Zeitabschnitt erfolgt, in dem die Tagesmitteltemperatur diesen Wertebereich nicht wieder unterschreitet, also keine längeren Kälteperioden oder gar Eistage auftreten. Im Allgemeinen weist dieser Zeitabschnitt eine Länge von fünf bis sieben Tagen auf. Für die folgenden Auswertungen wurde allerdings eine Länge von 30 Tagen festgelegt, um sicherzustellen, dass die unterschiedlichen „Empfindlichkeiten“ der Gemüsekulturen hinsichtlich Kälte- bzw. Frostperioden während ihrer Wachstumsphase ausreichend berücksichtigt werden können. Im Gegensatz zu perennierenden Pflanzen mit Dormanzverhalten im Winter bedürfen einjährige Gemüsekulturen keiner Unterschreitung einer Temperaturschwelle von 5°C. Spargel als ausdauernde Kultur hat zwar ein Kältebedürfnis, dies ist allerdings nicht entscheidend für den Sproßaustrieb im Folgejahr (siehe Kapitel Bleichspargel (*Asparagus officinalis* L.)). Deshalb wird hier für Spargel keine Temperaturschwelle für die Dormanz berücksichtigt. Die thermische Vegetationsperiode beginnt also an demjenigen Tag (im ersten Halbjahr), an dem zum ersten Mal die Temperaturschwelle von 5°C überschritten wurde und anschließend die Summe der Abweichungen der 30 Folgetage zu 5°C positiv, sprich $\sum h > 0^\circ\text{C}$ ist.

Dementsprechend endet die thermische Vegetationsperiode an dem Tag (im zweiten Halbjahr), an dem die Temperaturschwelle von 5°C zum letzten Mal überschritten und die Summe der Abweichungen der 30 Folgetage bzw. der verbleibenden Anzahl an Folgetagen bis zum Jahresende zu 5°C negativ, also $\sum h < 0^\circ\text{C}$ ist. Die Einschränkung bis zum Jahresende erfolgt aufgrund der Bedingung, dass die thermische Vegetationsperiode im jeweiligen Simulationsjahr beendet sein muss.

Daraus ergeben sich für den Beginn und das Ende der thermischen Vegetationsperiode die folgenden Berechnungsvorschriften:

$$\text{thermischer Vegetationsbeginn} \quad \sum_i (T_i - 5^\circ\text{C}) > 0^\circ\text{C} \quad (i = 2, 3, \dots, 30) \quad (1)$$

$$\text{thermisches Vegetationsende} \quad \sum_i (T_i - 5^\circ\text{C}) < 0^\circ\text{C} \quad (i = 2, 3, \dots, \text{Jahresende}) \quad (2)$$

Ausgehend von diesen Bedingungen wurden für jedes einzelne Jahr der jeweils 30jährigen Perioden 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 die thermischen Vegetationsbeginne und -enden bestimmt.

4.4. Modell zur kulturspezifischen Zusatzwasserbedarfsermittlung im Hessischen Ried

4.4.1. Einführung

Um ermitteln zu können, wann und wieviel Zusatzwasser benötigt wird, muss berücksichtigt werden, dass:

- der kulturspezifische Wasserbedarf sich stark unterscheidet
- sich der Wasserbedarf einer Kultur je nach Entwicklungsstadium ändert
- klimatische Faktoren Verdunstung und Transpiration beeinflussen
- sich die Durchwurzelungstiefe der Pflanzen im Boden im Laufe der Kulturzeit ändert
- Böden sich hinsichtlich ihrer Wasserhaltefähigkeit unterscheiden
- zu hohe Bewässerung zu Sauerstoff- und Nährstoffmangel im Boden und zu geringe Bewässerung zu Trockenstress führen kann.

Alle genannten Faktoren sollten in eine Bewässerungsentscheidung einfließen, weshalb eine Entscheidungshilfe benötigt wird, wann mit welcher Einzelwassergabenmenge bewässert werden soll. Dafür wurde ein vereinfachtes, Excel-basiertes Bewässerungsmodell auf Grundlage der Geisenheimer Steuerung (GS) programmiert. Voraussetzungen zum Anwenden dieser Methode sind das Vorhandensein der Referenz-Evapotranspirationswerte (ET_0), die Kenntnis über die pflanzenspezifischen Korrekturfaktoren (k_c Werte) in Abhängigkeit von Kulturart und Entwicklungsstadium, Niederschlagsdaten sowie das Messen der Beregnungsmengen auf der zu bewässernden Fläche.

Ein wesentlicher Bestandteil ist hierbei die Anpassung der k_c Werte an die morphologischen Entwicklungsstadien der jeweiligen Kultur, die Anpassung der Höhe der Einzelwassergaben an die Bodenart und die aktuelle Durchwurzelungstiefe der Pflanzen. Die klimatischen Entwicklungen im Hessischen Ried werden berücksichtigt, indem die Klimadaten aus den Regionalmodellen als Input in die Berechnungen einfließen. Die im Hessischen Ried vorherrschenden Bodenverhältnisse werden durch aggregierte nFK Werte berücksichtigt.

Um einen zukünftigen, kulturspezifischen Bewässerungsbedarf mit Hilfe des Modells zu berechnen, müssen vorab die Grundparameter ermittelt bzw. festgelegt werden. Im Wesentlichen sind dazu folgende Schritte notwendig:

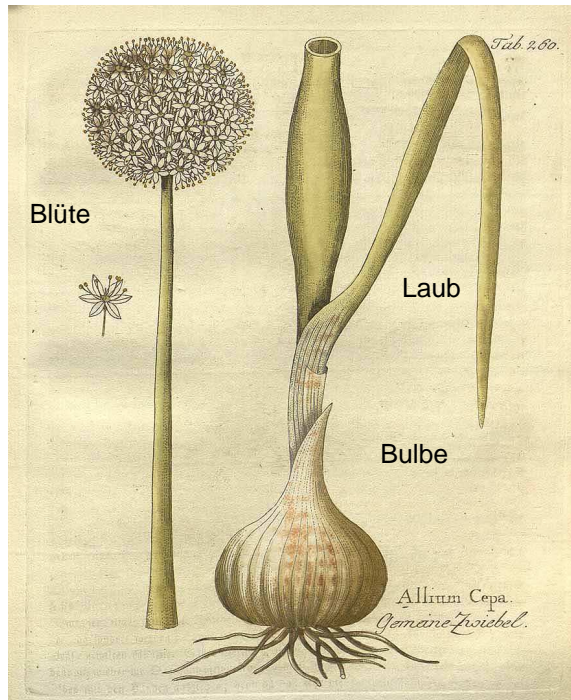
- Kulturauswahl und Auswertung der relevanten Kulturdaten
- Anbauzeitraum für die Kultur (Aussaat bis Ernte) festlegen
- Umstelltermine für k_c Werte anhand der Entwicklungsstadien festlegen (z.B. Temperatursummenbasiert)
- Bodenkenngrößen und -parameter ermitteln
- Bewässerungsmenge je Termin bestimmen
- tägliche Wasserbilanz berechnen
- Bewässerungszeitpunkt festlegen (z. B. nFK < 60%)

In den folgenden Unterkapiteln wird näher beschrieben, wie die einzelnen Parameter für die Modellregion Hessisches Ried und die Modellkulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel methodisch ermittelt wurden, um den kultur- und schlagspezifischen Wasserbedarf im Hessischen Ried unter Annahme eines Klimawandels zu berechnen.

4.4.2. Kulturauswahl unter Berücksichtigung bewässerungsrelevanter Kulturdaten

Der zukünftige Wasserbedarf soll für die Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel ermittelt werden. Hierzu wurden einige physiologische Daten für die einzelnen Kulturen anhand der Fachliteratur zusammengestellt (Hartmann, 2000; Kunzelmann, 1998; Wonneberg, 2004).

4.4.2.1. Sommertrockenzwiebel (*Allium cepa*)



Der Anbau von Zwiebeln erfolgt als Satzkultur von März bis September über direkte Aussaat. Diese kann bereits sehr früh im Jahr erfolgen, da Zwiebeln schon bei relativ geringen Temperaturen austreiben. Der beste Zeitraum für die Aussaat ist von Anfang März bis Mitte Mai, wenn die Tagesmitteltemperatur im Schnitt 5°C beträgt. Das Temperaturoptimum für die Keimung liegt bei 15 bis 25°C. Weiterhin haben Zwiebeln als Langtagpflanze ein hohes Lichtbedürfnis. Die Induktion der Bulbenbildung beispielsweise erfordert 14 Stunden Licht am Tag. Der optimale Erntezeitpunkt ist erreicht, wenn 70% der Zwiebeln einen natürlichen Schlottenknick zeigen und das obere Drittel der Schlotten eingetrocknet ist. Geerntet wird dann ab dem Schlottenknicken im Zeitraum von August bis Oktober. Die Kulturzeit beträgt im Schnitt 150 bis 170 Tage, sodass pro Jahr meist nur ein Satz angebaut wird.

Abbildung 4: Schematische botanische Darstellung von Sommertrockenzwiebel (*Allium cepa*)

Illustration von Vietz, F.B., *Icones plantarum medico-oekonomico-technologicarum*, vol. 3 (1806)

4.4.2.2. Buschbohne (*Phaseolus vulgaris*)

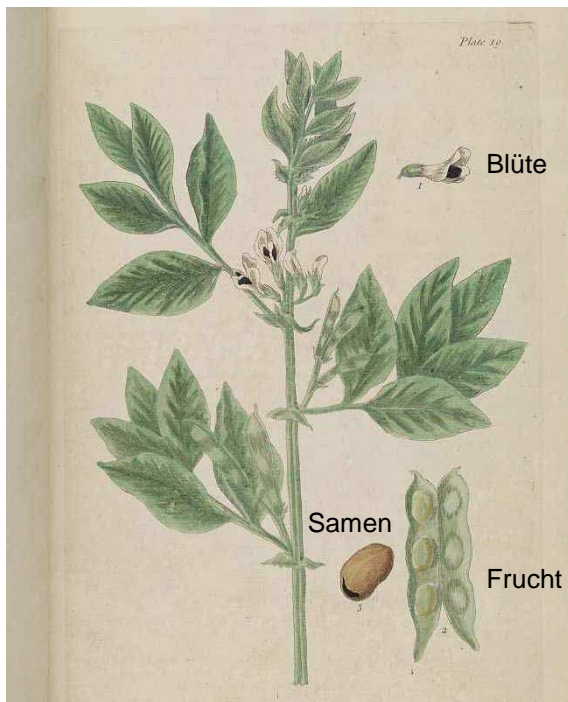


Abbildung 5: Schematische botanische Darstellung von Buschbohne (*Phaseolus vulgaris*)

Illustration von Blackwell, E., A curious herbal vol. 1 (1737)

Die Aussaat von Buschbohnen kann ab 10°C Boden- bzw. 12°C Lufttemperatur erfolgen (Wonneberg 2004). Allerdings sind Buschbohnen wind- und frostempfindlich, weshalb sie im Freiland oftmals erst Mitte Mai, nach den so genannten Eiseiligen, ausgesät werden. Der Anbau erfolgt als Satzkultur. Da die durchschnittliche Kulturdauer bei 60 bis 70 Tagen liegt, sind oft mehrere Sätze pro Jahr möglich. Die Ernte erfolgt je nach Saatzeit im Zeitraum von Ende Juli bis Mitte Oktober.

4.4.2.3. Bleichspargel (*Asparagus officinalis* L.)



Abbildung 6: Schematische botanische Darstellung von Spargel (*Asparagus officinalis* L.)

Illustration von Losch, F., Kräuterbuch, unsere Heilpflanzen in Wort und Bild, Zweite Auflage (1905)

Die Kultur Spargel weist einige Besonderheiten auf, die im Zusammenhang mit der Berechnung des zukünftigen Wasserbedarfs beachtet werden müssen. Spargel ist im Vergleich zu den beiden einjährigen Kulturen eine ausdauernde Pflanze. Die Jungpflanzenanzucht erfolgt über Aussaat und Kultivierung im Freiland von Mitte April bis Ende März des Folgejahres. Nach Rodung der Spargelrhizome werden diese Anfang April gepflanzt auf dem Produktionsstandort. Die Spargelpflanzen verbleiben ca. acht Jahre auf dieser Ertragsfläche. Im Frühjahr treiben ihre Sprosse (das Ernteprodukt) aus den Rhizomknospen aus, im Sommer assimilieren die verbleibenden Sprosse und lagern die Photosyntheseprodukte in die Speicherwurzeln ein. Das Laub stirbt im Herbst ab und das Rhizom geht in die Winterruhe. Der Zeitpunkt und die Stärke des Knospenaustriebs sind abhängig vom Kohlenhydratspeicher in den Speicherwurzeln und der vorausgegangenen Boden- und Lufttemperatur. Mit dem Zeitpunkt des Austriebs gehen sowohl das Ernteende und damit der Beginn der eigentlichen Vegetationsperiode einher, in welcher Bewässerung stattfindet. Das Ernteende variiert zusätzlich in den ersten Kulturjahren: Im ersten Erntejahr wird etwa 14 Tage, im dritten Standjahr etwa vier Wochen und in den nachfolgenden Vollertragsjahren maximal neun Wochen geerntet. Daraus ergibt sich eine variierende Vegetations- bzw. Bewässerungsperiode in Beginn und Dauer. In der Variabilität der Vegetationsperiode liegt die besondere methodische Herausforderung für die jährliche Wasserbedarfsberechnung. Zur Simulierbarkeit des Wasserbedarfs wird jedes Simulationsjahr der Modelle als Vollertragsjahr angesehen.

Bei Ertragsanlagen erfolgt die Bewässerung nach Ernteende, vor allem während der Hauptwasserbedarfszeit im Juli / August. Bezogen auf eine Wasserbedarfsberechnung muss also beachtet werden, dass die Ernte des Spargels wie ein Vorstadium, ähnlich dem Auflaufen-Stadium der Zwiebeln, behandelt wird. Demnach entspricht also der reelle Erntebeginn dem Kulturstart im Bewässerungsmodell, das reelle Ernteende dem Beginn der Bewässerung im Modell und das Ende der Bewässerungsphase in der Praxis dem modellinternen Kulturende. Diesbezüglich

muss noch beachtet werden, dass die Bewässerung in der Praxis Anfang September abgestellt wird. Es gibt also keine physiologische Datengrundlage für das „Kulturende“. Dementsprechend muss auch im Bewässerungsmodell mit einem fixen Kulturende gerechnet werden. Als Kulturdauer wird der Zeitraum von Erntebeginn (15. April) bis zum Ende der Bewässerung (01. September) definiert. Somit wird ein fixer Termin für das Sproßwachstum angenommen, welcher auf der Datengrundlage von Spargelversuchen zu k_c -Werten der Hochschule Geisenheim beruht. Mit dieser Annahme ist die Simulation fehlerbehaftet, da der Sproßaustrieb stark temperaturabhängig ist. Der gewählte Zeitpunkt korrespondiert allerdings im Durchschnitt mit den Temperaturangaben in der Literatur für den Beginn des Sproßwachstums, wenn, wie im Fall Geisenheim, keine Verfrühungsmaßnahmen getroffen werden (Le

Compte und Blumenfield, 1958; Blumenfield et al., 1961; Takatori et al., 1977; Robb, 1984; Heissner et al., 2006).

4.4.2.4. Bestimmen des Kulturbeginns anhand physiologischer Merkmale der Kulturen

Für die Berechnung des kulturspezifischen Wasserbedarfs unter der Annahme eines stattfindenden Klimawandels wurden zwei Betrachtungsweisen gewählt. Zum einen wird eine Kulturführung unter klassischen Anbaubedingungen angenommen, wobei diese Anbauperiode den Zeitraum von März bis Oktober abdeckt. Die Aussaat erfolgt dann, wie heutzutage in der Praxis üblich, für Zwiebeln im März, für Buschbohne Mitte Mai und für Spargel Mitte April. Für die Auswertung der klimatischen Datensätze wird der Aussaattermin für Zwiebel daher auf den 15. März gelegt. Analog dazu wird der Aussaattermin für Buschbohnen auf den 15. Mai und für Spargel dementsprechend auf den 15. April gelegt.

Zum anderen wird eine Kulturführung mit zeitlich variablen Anbauzeiträumen betrachtet, indem Verschiebungen phänologischer Phasen in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung im Rahmen des simulierten Klimawandels berücksichtigt werden. Die Tatsache, dass Zwiebeln bereits bei niedrigen Temperaturen ausgesät werden können, vereinfacht die Terminierung des Aussaattermins. Dieser wird mit dem thermischen Vegetationsbeginn, der bei $\geq 5^\circ\text{C}$ liegt, gleichgesetzt. Für die Buschbohnen ist, wie bereits erwähnt, die Frostempfindlichkeit zu berücksichtigen. Der thermische Schwellenwert wird daher entsprechend den Angaben aus der Literatur auf $\geq 12^\circ\text{C}$ festgelegt. Gleichzeitig muss die Bedingung erfüllt sein, dass im Zeitraum nach der Aussaat keine Frostereignisse auftreten. Für den Sonderfall Spargel gilt, dass der Kulturbeginn im Bewässerungsmodell eigentlich dem realen Beginn der Ernte entspricht, da Spargel ab der Ernte bewässert wird. Es besteht also keine direkte Abhängigkeit zwischen dem Kulturbeginn (Bewässerungszeitraum) im Modell und dem physiologischen Wachstum der Spargelpflanze. Um in der Wasserbedarfsberechnung für Spargel in jedem Simulationsjahr der Klimamodelle variable Startzeiten für den Kulturzeitraum (= Bewässerungszeitraum) integrieren zu können, wurden Datensätze aus Freilandversuchen in Geisenheim ausgewertet. Diesbezüglich erfolgte eine Abfrage der kumulierten Tagesmitteltemperatursumme vom Jahresbeginn (01.01) bis zum jeweiligen Erntebeginn (Beginn der Bewässerung) des entsprechenden Versuchsjahres. Der so ermittelte Schwellenwert (akkumulierte Temperatursumme in $^\circ\text{Cd}$) wurde im Anschluss für die Abfrage des Kulturbeginns in den Simulationsdaten der Klimamodelle herangezogen. Als Kulturbeginn wurde dann jener Tag festgelegt, an dem dieser Schwellenwert erreicht wurde.

4.4.3. Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz (KWB) ist eine Größe, die im Freilandgemüseanbau häufig zur Bewässerungssteuerung herangezogen wird. Sie berechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und der potentiellen Verdunstung des Bodens und des Pflanzenbestands (Evapotranspiration). Mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz lassen sich also die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf den Wasserhaushalt beobachten. Die Berechnung der Verdunstung erfolgt nach FAO 56 auf Tagesbasis für die Zeiträume 1971 – 2000, 2031 - 2060 sowie 2071 - 2100 mit den simulierten klimatischen Daten der drei Regionalmodelle WETTREG 2010, REMO sowie C-CLM. Die Verdunstungswerte werden mit den simulierten Niederschlagsdaten der Zeitreihen verrechnet, resultierend in der klimatischen Wasserbilanz.

$$KWB = N - ET_0 \quad (3)$$

Für die Berechnung des kulturspezifischen Wasserbedarfs unter Zuhilfenahme der klimatischen Wasserbilanz, wird die aus meteorologischen Modelldaten täglich berechnete potentielle Verdunstung ET_0 (FAO 56 Grasreferenzverdunstung) mit einem Korrekturfaktor (k_c) multipliziert. Diese k_c Werte werden

für zahlreiche Gemüsearten in Geisenheim bestimmt und evaluiert¹ (Paschold *et al.* 2011). Da der k_c Wert anhand von Entwicklungsmerkmalen der Pflanzen definiert wird (BBCH Code²), erfolgt somit eine Anpassung an die Gemüseart und deren Entwicklungszustand. Die kulturspezifische Evapotranspiration ET_c ergibt sich somit also aus der Multiplikation der Referenzevapotranspiration ET_0 mit einem je nach Entwicklungsstadium spezifischem k_c Wert.

$$KWB_{kulturspezifisch} = N - ET_c = N - (ET_0 \times k_c) \quad (4)$$

Die Korrekturfaktoren (k_c Werte) für die unterschiedlichen Entwicklungsstadien nach BBCH-Code der Kulturen Buschbohne, Spargel und Zwiebel sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Pflanzenkoeffizienten (k_c Werte) zum Steuern der Bewässerung nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung bei Verwendung der FAO 56 Grasreferenzverdunstung anhand phänologischer Stadien (BBCH Code)

Stadium	Gemüseart					
	Buschbohne		Spargel		Zwiebel	
Boden unbewachsen	ab Aussaat					
	0.15 (k_c Wert)					
Stadium 1	ab Auflaufen	0,4	ab Aufwuchs	0,8	ab Auflaufen	0,7
	BBCH 09				BBCH 09	
Stadium 2	ab Blühbeginn	1,1	ab vollständiger Phyllokla- dientausbildung	1,1	ab 5. Blatt	1,4
	BBCH 61				BBCH 15	
Stadium 3	erste Hülse volle Länge	1,4	ab September	--	ab 8. Blatt	1,7
	BBCH 71				BBCH 18	

Die Festlegung, welcher k_c Wert zu welchem Zeitpunkt mit der Verdunstung verrechnet wird, ist demnach vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze abhängig. Diese werden anhand phänologischer Merkmale definiert, wobei die Phänologie wiederum durch klimatische Verhältnisse beeinflusst wird. Inwiefern sich die einzelnen Entwicklungsstadien der Kulturen in Abhängigkeit vom Klimawandel verändern könnten, wurde durch eine Methode, basierend auf der Generierung von Temperatursummen ermittelt. Diese Methode basiert auf der Annahme, dass zum Eintreten des jeweiligen Entwicklungsstadiums eine bestimmte Temperatursumme erreicht sein muss.

4.4.4. Festlegen der k_c - Umstelltermine

Für die Analyse, inwiefern sich die einzelnen Entwicklungsstadien der Kulturen und damit die k_c Umstelltermine in Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung verändern, wurden sowohl phänologische als auch meteorologische Daten der letzten Jahre aus Freilandversuchen in Geisenheim herangezogen. Die Aufzeichnungen beinhalten Informationen zum Aussaattermin, zu den Umstellterminen

¹ Die Beschreibung der Geisenheimer Bewässerungssteuerung sowie die aktuellen k_c -Werte für Gemüsekulturen sind unter <https://www.hs-geisenheim.de/forschung/institute/gemuesebau/ueberblick-institut-fuer-gemuesebau/bewaesserung/geisenheimer-bewaesserungssteuerung/> zu finden

² Der BBCH-Code gibt Auskunft über das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze. Die Abkürzung steht offiziell für die ursprünglich beteiligten Organisationen Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie. Aktuelle Ausgabe der BBCH Skala unter <https://www.julius-kuehn.de/publikationsreihen-des-iki/bbch-skala/>

der einzelnen k_c - Stadien, zur Ernte sowie zu den jeweiligen klimatischen Bedingungen während der Kulturzeit. Auf Grundlage dieser Daten wurde die Pflanzenentwicklung mit korrespondierenden Klimadaten ausgewertet.

Für jedes einzelne dokumentierte Versuchsjahr wurden Eintritt und Dauer der einzelnen k_c -Stadien ausgehend vom Aussaattermin über akkumulierte Klimaparameter, hier univariat über die Tagesdurchschnittstemperatur, abgebildet. Daraus resultierten Temperatursummen (in Gradtagen, °Cd) für die jeweiligen Umstelltermine der einzelnen k_c -Stadien. Im Anschluss daran wurden diese Temperatursummen aller Versuchsjahre gemittelt, um für die jeweilige Kultur und den jeweiligen k_c -Wert durchschnittliche Werte zu erhalten, die als Orientierung dienen. Die Schwellenwerte für Buschbohne, Zwiebel und Spargel, die aus Freilandversuchen in Geisenheim ermittelt worden sind, sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Erforderliche Temperatursumme (°Cd) für die k_c - Umstelltermine je nach Gemüseart

Gemüseart	Temperatursumme (°Cd) von Aussaat bis ...			
	k_c 1	k_c 2	k_c 3	Ernte
Buschbohne	170,7	815,8	984,9	1209,5
Zwiebel	269,3	1036,1	1475,1	1909
Spargel	942,93	1501,80	---	2477,18

Die anhand von Temperatursummen festgelegten „Schwellenwerte“, wann ein Stadienwechsel und damit ein k_c -Wertwechsel bei Zwiebeln, Buschbohne bzw. Spargel anhand der Temperatursumme erfolgte, können dann entsprechend auf die Simulationsdatensätze der einzelnen Modelle übertragen werden. Es erfolgt demnach, ausgehend vom Aussaattermin, eine Abfrage innerhalb der Modellsimulationsdaten, wann der jeweilige Schwellenwert für den Umstelltermin der k_c -Stufen in der Bewässerungssteuerung erreicht ist, um somit den einzelnen Stadien den entsprechenden k_c - Faktor zuzuordnen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine relativ dynamische, klimabeeinflusste Darstellung der möglichen Kulturentwicklung während des Anbauzeitraumes (thermische Vegetationsperiode). Daraufhin kann in Abhängigkeit von der Kulturentwicklung die tägliche potentielle Verdunstung ET_0 (Grasreferenzverdunstung nach FAO 56) mit dem jeweiligen k_c Wert verrechnet werden. Daraus resultieren kulturspezifische klimatische Wasserbilanzen, die als Maß für die Wasserbedarfe der jeweiligen Kulturen, in Abhängigkeit von ihren Entwicklungsstadien, herangezogen werden können.

4.4.5. Bodenkenngrößen und -parameter

In die Berechnung des Bewässerungsbedarfs muss die Menge und Verfügbarkeit der Bodenwasservorräte einbezogen werden. Die nutzbare Feldkapazität beschreibt das maximale Bodenspeichervermögen für pflanzenverfügbares Wasser. Sie berechnet sich aus der Differenz von Feldkapazität und Totwasseranteil und wird in Prozent des Bodengewichts (Gew.-%), in Prozent des Bodenvolumens (Vol.-%) oder in mm Wasser im durchwurzelten Bodenraum gemessen. Dabei entspricht ein Volumenprozent Wasser einem mm Wasser in 10 cm Bodentiefe [1 Vol.-% = 1 mm/dm = 1 l/m² je dm].

Im Hessischen Ried sind vorwiegend Böden der Bodenklassen Sand (S) bis sandiger Lehm (sL) vertreten, was generell einem nFK Bereich von 9 bis 20 mm / dm entspricht (Tabelle 5). Anhand der verfügbaren nFK Daten für das Hessische Ried (s. Abbildung 2) können die tatsächlichen Wertebereiche für die einzelnen Bodenhorizonte 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm ermittelt werden. Zur Berechnung des kulturspezifischen Wasserbedarfs für das Hessische Ried wurde ein „Modellboden“ basierend auf mittleren nFK Werten für die einzelnen Bodenhorizonte angenommen: 60 mm (0 - 30 cm), 50 mm (30 - 60 cm) und 45 mm (60 - 90 cm).

Darüber hinaus ist es noch erforderlich, die durchwurzelte Bodentiefe zu kennen. Diese ist sowohl vom Boden (durchwurzelbarer Bodenraum) als auch von der Kultur (Kulturart, Entwicklungsstadium) abhängig. Bei der Berechnung der Bewässerungsmenge wird sie als nutzbare Bodentiefe zugrunde gelegt. Buschbohne und Zwiebel durchwurzeln die Böden bis rund 60 cm und Spargel bis > 90 cm.

Tabelle 5: nFK Werte für die Bodenklassen in 30, 60 und 90 cm Bodentiefe (HLNUG, 2008a)

Bodenart	nFK	nFK (mm) in Tiefe von		
	mm / dm	30 cm	60 cm	90 cm
Sand (S)	9	27	54	81
anlehmiger Sand (SI)	13	39	78	117
Lehmiger Sand (IS)	15	45	90	135
Stark lehmiger Sand (SL)	19	57	114	171
Sandiger Lehm (sL)	20	60	120	180

4.4.6. Berechnung der täglichen Wasserbilanz

Bei der Bilanzierung der klimatischen Wasserbilanz (KWB) als Grundlage für die Ermittlung des Zusatzwasserbedarfs wird kontinuierlich der tägliche Wasserverbrauch einer Kultur aufsummiert und den ebenfalls aufsummierten Niederschlägen sowie Beregnungsmengen gegenübergestellt. Ist innerhalb eines definierten Zeitraumes die Niederschlagsmenge größer als die Verdunstung, ergibt sich eine positive Bilanz. Umgekehrt ergibt sich demnach eine negative Bilanz. In der Praxis erfolgt die Bewässerungssteuerung mit der KWB in mehreren Schritten.

1. Bodenwasservorräte durch Vorwegberegnung auffüllen:

Ausgangspunkt ist ein durch Winterfeuchte, Niederschlag oder Beregnung auf ca. 90% nutzbarer Feldkapazität aufgefüllter Boden. Für die Kalkulation ergibt sich dadurch ein definierter Startwert.

2. Bestimmung der Beregnungsmenge je Einzelgabe:

Berücksichtigung der in der jeweiligen Entwicklungsphase vorliegenden Durchwurzelungstiefe. Die Wassergabe muss so hoch sein, dass in jedem Stadium die durchwurzelte Bodentiefe durchfeuchtet wird.

Beispiel: 27 mm für Zwiebel auf lehmigem Sand für 0 - 60 cm Bodentiefe, um von 60 auf 90% nFK aufzufüllen.

3. Tagesbilanz Niederschlag (N) - (ET₀ x k_c) berechnen:

Berücksichtigung des jeweiligen k_c Wertes. Dieser richtet sich nach der Gemüseart und deren Entwicklungsstadium. Die Verdunstung wird bspw. mit einer eigenen Wetterstation ermittelt oder anderweitig zur Verfügung gestellt.

Beispiel: Zwiebel (Stadium 2)

Niederschlag [mm]	-	(ET ₀ x k _c) [mm]	=	Tagesbilanz [mm]
2	-	(4,2 x 1,4)	=	- 3,88

4. Bilanzen durch Aufsummieren der täglichen Wasserbilanzen berechnen:

Eine Zusatzwassergabe wird erforderlich, wenn der negative Tagesbilanzschwellenwert, der 60% nFK entspricht und sich für jede Kultur, Entwicklungsstadium und Bodenart aus der Summierung der Tagesbilanzen ergibt, erreicht bzw. unterschritten wird. Erreicht der Wert also den vorgegebenen Schwellenwert, im Beispiel 30 mm, wird bewässert. Die jeweiligen Zusatzwassermengen (hier 27 mm) gehen, analog der natürlichen Niederschläge, als Positivposten in die Bilanzsumme ein. Grundlage für das unten aufgeführte Rechenbeispiel sind die in Tabelle 5 aufgeführten Zusatzwassermengen, die zur Auffüllung ausgehend von einer nFK von 60% auf 90% erforderlich sind. Im vorliegenden Beispiel wurden die Kultur Zwiebel sowie lehmiger Sand zur Veranschaulichung gewählt.

Beispiel: Zwiebel (Stadium 2, ab 05.07. Stadium 3)

Datum	Niederschlag [mm]	-	(ET ₀ [mm])	x	k _e	Tagesbilanz [mm]	Berechnungs- menge [mm]	Gesamtbilanz [mm]
30.06	2	-	(4.2	x	1.4)	- 3.88		= - 3.88
01.07			(5.0	x	1.4)	- 7		= - 10.88
02.07			(5.7	x	1.4)	- 7.98		= - 18.86
03.07			(5.2	x	1.4)	- 7.28		= - 26.14
04.07			(3.6	x	1.4)	- 5.04		= - 31.18
05.07			(2.8	x	1.7)	- 4.76	- 27	= - 8.94
06.07	35	-	(4.3	x	1.7)	- 27.69		= 0.0

4.5. Kosten für den Zusatzwasserbedarf

Die Kalkulation der Zusatzwasserkosten erfolgte auf Grundlage der kulturspezifischen Zusatzwasserbedarfe aus dem Bewässerungsmodell der drei Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel. Im Vordergrund stand der Vergleich der Bewässerungskosten zwischen einer Rohrberegnung und einer Tropfbewässerung. Grundlegend beziehen sich die Berechnungen auf die Daten zur Bewässerung während eines Anbausatzes der Kulturen. Das heißt, es wurden die Kosten bezogen auf die gesamte Bewässerungsmenge [mm] und die gesamte Anzahl der Einzelgaben pro Anbausatz der jeweiligen Kultur ermittelt.

4.5.1. Bewässerungstechnik

Die weit verbreitete Rohrberegnung kommt bei vielen Gemüsekulturen auf nicht wechselnden Flächen oder mit häufigem Beregnungsbedarf zum Einsatz. Sie hat die Vorteile, dass sie auf vielen Flächen (z.B. nicht rechteckig, mit Hindernissen) eingesetzt werden kann, die Erschließungskosten für diese Flächen gering sind und sie schnell mobil sowie flexibel einsetzbar ist. Ebenso erfolgt die Wasserverteilung großflächig. Des Weiteren hat diese Technik einen nur geringen Anspruch an die Wasserqualität und sowohl niedrige als auch hohe Bewässerungsgaben sind möglich. Die Rohrberegnung ist auch die einzige Bewässerungstechnik, mit der sich eine Frostschuttberegnung realisieren lässt. Nachteile bei dieser Bewässerungstechnik sind der hohe Arbeitskräfte- sowie Energiebedarf während der Beregnungssaison, da der Auf- und Abbau bzw. das Umsetzen einen außerordentlich hohen Arbeitsaufwand erfordern. Zudem ist die Wasserverteilung äußerst windempfindlich, sodass sich aufgrund der

Überlappung der Wasserstrahlen der Regner eine schlechte Wasserverteilungsgenauigkeit ergibt und zudem ein großes Verschlammungsrisiko des Bodens besteht. Ein vollautomatischer Einsatz ist bei einer Rohrberegnung nicht möglich.

Die Tropfbewässerung hat gegenüber der Rohrberegnung den Vorteil, dass eine wasser- und energieeffiziente Ausbringung und Verteilung möglich ist, da das Wasser punktförmig direkt an die Wurzeln gelangt. Die Wasserverluste durch Verdunstung, Windabdrift und damit verbunden eine schlechte Wasserverteilung werden bei Einsatz der Tropfbewässerung minimiert. Das Risiko einer Verschlammung des Bodens ist ebenfalls nicht gegeben. Sie ist daher wesentlich effektiver gegenüber der flächigen Rohrberegnung. Einen zusätzlichen Vorteil dieser Bewässerungstechnik stellt die Möglichkeit dar, Flüssigdünger mit ausbringen zu können sowie die Möglichkeit eines vollautomatisierten Einsatzes. Allerdings weist diese Bewässerungstechnik einen höheren Investitions- und Arbeitskraftbedarf für den Auf- und Abbau sowie den Betrieb des Systems auf, was als nachteilig zu betrachten ist. Ebenso nachteilig ist, dass die Tropfbewässerung in einer Beregnungssaison an die Fläche gebunden ist. Aus diesen praktischen Gründen ist sie weniger weit verbreitet als bspw. die Rohrberegnung. Die Tropfbewässerung eignet sich aufgrund der genannten technischen und ökonomischen Besonderheiten insbesondere für den Anbau von Sonderkulturen, wie z.B. Gemüse. Dabei kommt sie vorwiegend bei Intensivkulturen mit häufigem Beregnungseinsatz oder Dauerkulturen, also mit langen Standzeiten auf dem Feld zum Einsatz. Dazu zählen Kulturen wie Einlegegurken, Kohl, Salat, Zucchini oder Spargel.

4.5.2. Kalkulationsgrundlagen

Für die Kostenkalkulation wurden Kennzahlen für die jeweilige Bewässerungstechnik aus der KTBL Datensammlung „Freilandbewässerung“ (2013) herangezogen. Es wird ein **Wasser-Grundpreis von 0,23 € / m³** angenommen (nach KTBL). Weiterhin wurden neben den Kosten für das Zusatzwasser, auch noch die Kosten für den Betrieb der jeweiligen Bewässerungstechnik in die Kalkulation integriert.

Die reinen Wasserkosten von Tröpfchen- und Rohrberegnung unterscheiden sich nicht voneinander, da in beiden Varianten die gleiche kulturspezifische Zusatzwassermenge, die sich aus dem berechneten Bedarf nach Geisenheimer Bewässerungssteuerung ergibt, in die Kalkulation eingeht. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Geisenheimer Bewässerungssteuerung auf der Berechnung der klimatischen Wasserbilanz basiert. Bei einer Tropfberegnung treten wesentlich geringere Verluste durch Evaporation als bei einer Rohrberegnung auf. Daher müssten die Beregnungsmengen bei der Tropfberegnung ebenfalls geringer ausfallen. Allerdings wurden die Bewässerungsmengen unabhängig von der Bewässerungstechnik auf rein klimatischer Ebene mit kulturspezifischem Bezug berechnet, d. h. ein Einfluss der jeweiligen Bewässerungstechnik wurde nicht berücksichtigt.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Bewässerungstechniken besteht daher in den Betriebskosten. Die Grundpreise für den Betrieb der Bewässerungstechnik (fix und variabel) werden sowohl mit der benötigten Zusatzwassermenge als auch mit der Anzahl der dafür benötigten Einzelgaben verrechnet. Somit fließen indirekt sowohl die Energiekosten durch Berücksichtigung der Höhe der Einzelgaben als auch die Arbeitskraftstunden (AKh) durch die Anzahl der Einzelgaben mit in die Kalkulation ein.

Nicht mitberücksichtigt wurden die Kosten für die Anschaffung und Instandhaltung der Technik, die Lohnkosten sowie die Kosten für den Materialtransport (vom Betrieb zur Fläche sowie wieder zurück), den Aufbau, den Anschluss und den Abbau der Beregnungstechnik. Nachfolgend sind die standardisierten Annahmen und deren Kennzahlen sowie Kalkulationsbeispiele aus der KTBL Datensammlung aufgeführt, die als Grundlage für die Kostenkalkulationen dienen.

Annahmen für Rohrberegnung

- Bewässerung eines 5 ha Schlages (angenommene Hof-Feld-Entfernung 2 km)
- Rohrberegnungsanlage im Verband 12 x 18 m, Rohrdurchmesser 70 mm, Einzellagerung der Elemente
- Kosten für Bewässerung je Einzelgabe [je mm]: fix 0,158 € / variabel 0,027 €

Tabelle 6: Beispielkalkulation der Betriebskosten bei fünf Zusatzwassergaben von jeweils 20 mm für Rohrberegnung (nach KTBL)

Arbeit	Betriebskosten	
	fix	variabel
	€/ (ha x a)	
Rohrberegnung betreiben	15,80	2,70
für eine Aufstellung je Jahr; Traktor, 45 kW; Zweiachs-Plattformwagen, 12 t; 2 Saison-AK	(5 x 20 mm x 0,158)	(5 x 20 mm x 0,027)
Summe	15,80	2,70

Jahreskosten zur Ausbringung von 100 mm Zusatzwasser mit Rohrberegnung

Betriebskosten (fix + variabel)	18,50 € / (ha x a)
Zusatzwasser	230,00 € / (ha x a)
Summe Kosten	248,50 € / (ha x a)

Annahmen für Tropfbewässerung

- Bewässerung eines 5 ha Schlages (angenommene Hof-Feld-Entfernung 2 km)
- Oberirdisch verlegte, nicht druckkompensierte Tropfbewässerungsanlage mit Tropfabstand von 0,75 m
- Kosten für den Betrieb der Anlage je Einzelgabe [je Anzahl]: fix 3,27 € / variabel 0,55 €
- Kosten für Bewässerung je Einzelgabe [je mm]: fix 16,78 € / variabel 0,68 €

Tabelle 7: Beispielkalkulation der Betriebskosten bei zehn Zusatzwassergaben von jeweils 4 mm und sechs Zusatzwassergaben von jeweils 10 mm für Tropfbewässerung (nach KTBL)

Arbeit	Betriebskosten	
	fix	variabel
	€/ (ha x a)	
Tropfbewässerung betreiben	52,32	8,80
(ein- und ausschalten, Teilbreiten schalten, Funktionskontrolle); Pick-up, 120 kW; 1 Fest-AK	(16 x 3,27)	(16 x 0,55)
Bewässern (4 mm)	671,20	27,30
mit nicht druckkompensierter Tropfbewässerung, einseitige Verteilung, Tropfrohrabstand 0,75m	(10 x 4 mm x 16,78)	(10 x 4 mm x 0,68)
Bewässern (10 mm)	1.006,80	40,95
mit nicht druckkompensierter Tropfbewässerung, einseitige Verteilung, Tropfrohrabstand 0,75m	(6 x 10 mm x 16,78)	(6 x 10 mm x 0,68)
Summe	1730,32	77,05

Jahreskosten zur Ausbringung von 100 mm Zusatzwasser mit Tropfbewässerung

Betriebskosten (fix + variabel)	1807,37 € / (ha x a)
Zusatzwasser	230,00 € / (ha x a)
Summe Kosten	2037,37 € / (ha x a)

Die Beispielkalkulationen machen deutlich, dass sich die Betriebskosten zwischen den Bewässerungstechniken stark voneinander unterscheiden. Des Weiteren wird ersichtlich, dass in den gewählten Beispielen die Kosten für das Zusatzwasser bei der Rohrberegnung den höchsten und im Gegensatz dazu bei der Tropfbewässerung den geringsten Anteil ausmachen. Allerdings liegt dies daran, dass nur die Betriebskosten für das Bewässern in die Kalkulation einfließen. Würden, ausgehend von den Beispielkalkulationen nach KTBL, zusätzlich die Lohn- sowie Maschinenkosten (Transport, Auf- und Abbau der Bewässerungstechnik usw.) berücksichtigt, dann ließe sich jedoch feststellen, dass die Kosten für das Zusatzwasser den geringsten Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Aus ökonomischen Gesichtspunkten steht Wassersparen daher erst einmal nicht im Vordergrund.

4.6. Modellversuch zur Bewässerung und Stickstoffverlagerung von Zwiebeln im Lysimeter

Untersucht wurde der Einfluss einer Niederschlagsumverteilung vom Sommer in den Winter auf Pflanzenentwicklung, Zusatzwasserbedarf, Sickerwasserbildung sowie den Nitrataustrag von Speisezwiebeln in einem Gefäßversuch unter Freilandbedingungen in den Jahren 2011 bis 2013.

4.6.1. Versuchsvarianten

Basis waren mittlere Niederschlagsverteilungen des Standorts Mannheim der Jahre 1971 bis 2000 mit einer mittleren Niederschlagsmenge von 674 mm pro Jahr. Dieses Niederschlagsszenario wurde als Versuchsstandard Variante 1 simuliert und dabei die mittlere Niederschlagssumme pro Monat, die mittlere Regenhäufigkeit pro Monat sowie die mittlere Niederschlagsmengenverteilung pro Monat nachgebildet. Ein über die drei Versuchsjahre gleichbleibender Regenplan wurde erstellt, bei dem die mittleren Niederschlagsereignisse zufällig auf die Arbeitstage des jeweiligen Monats verteilt wurden.

In weiteren Versuchsvarianten wurden die Niederschläge der Monate Mai bis August um 10%, 20% oder 40% reduziert, indem entsprechend viele Niederschlagsereignisse aus dem Regenplan - zufällig ausgewählt - entfernt wurden (siehe Tabelle 8). Die Regenmengen dieser Regenereignisse wurden gleichmäßig auf die Monate September bis April verteilt. Die simulierten Regenmengen pro Monat zeigt Tabelle 9. Der Regenplan beispielhaft für den Monat Juli ist im Anhang in Tabelle A 7 dargestellt.

Der Versuch wurde als Blockanlage mit 4 Wiederholungen angelegt. Ein Behälter mit 0,75 m² und ca. 75 Pflanzen wurde als Parzelle gewertet.

Tabelle 8: Versuchsvarianten (n = 4 Behälter)

Variante	Niederschlagsszenarium	Kurzbezeichnung
1. Standard	Langjähriges Mittel Mannheim 1971 - 2000	1. Niederschlag 1971-2000
2.	Mai - August -10%, September - April +10%	2. Sommer - 10%
3.	Mai - August -20%, September - April +20%	3. Sommer - 20%
4.	Mai - August -40%, September - April +40%	4. Sommer - 40%

Tabelle 9: Verteilung der monatlichen Niederschläge (mm) bei vier Niederschlagsszenarien, Zwiebel im Lysimeterversuch

	1. Niederschlag 1971-2000	2. Sommer - 10%	3. Sommer - 20%	4. Sommer - 40%
März	40	44	48	54
April	44	48	52	58
Mai	70	62	56	42
Juni	86	78	68	54
Juli	86	78	70	52
August	52	46	40	30
September	58	62	66	72
Oktober	50	54	58	66
November	62	64	68	76
Dezember	48	52	56	62
Januar	40	44	48	56
Februar	38	42	44	52
Summe Mai bis Aug	294	264	234	178
Summe Sep bis April	380	410	440	496
Summe	674	674	674	674

4.6.2. Versuchsdurchführung

Lysimeter

Die Versuche wurden in wiegbaren Lysimetern in Geisenheim durchgeführt. Bei den Lysimetern handelt es sich um 420 L Behälter, die mit dem in Geisenheim anstehendem sandigem Lehm (sL) in den 1990er Jahren gefüllt wurden. Obwohl es sich bei den verwendeten Lysimetern um gefüllte Behälter und nicht um gestochene Bodenmonolithe handelt, wird ein annähernd natürliches Sickerverhalten erwartet. Der Boden befindet sich seit mehr als 20 Jahren in den Behältern und seither sollte sich die Lagerung des Bodens annähernd natürlichen Verhältnissen angepasst haben.

Die Behälter weisen eine Oberfläche von 0,75 m² und eine Füllhöhe von 56 cm auf. Sie stehen so tief in Schächten, dass die Behälteroberfläche der umgebenden Bodenoberfläche entspricht. Die Behälter verfügen am Behälterboden über eine ca. 5 cm hohe Drainageschicht, die mit einem Vlies vom Boden getrennt ist, sowie einen Ablauf. Die auslaufenden Sickerwassermengen wurden über Schläuche in Kanistern gesammelt. Eine mobile, automatisch gesteuerte Überdachung hielt natürliche Niederschläge ab. Die Lysimeter sind in Abbildung 7 dargestellt.

Kulturbedingungen

Die Aussaat der Zwiebeln mit 200 Korn/m² erfolgte Anfang/Mitte März (Tabelle 10). Die Sämlinge waren Anfang April gekeimt, im Jahr 2013 infolge niedrigerer Temperaturen erst Mitte April und wurden zu diesem Zeitpunkt auf 100 Pflanzen/m² vereinzelt. Die Entwicklung der Zwiebeln war im Jahr 2013 infolge niedriger Frühjahrstemperaturen deutlich verzögert im Vergleich zu den beiden ersten Versuchsjahren. Gekeimt waren die Zwiebeln in den Jahren 2011 und 2012 ca. 20 Tage, im Jahr 2013 erst ca. 40 Tage nach Aussaat. Die Entwicklungsverzögerung im Jahr 2013 blieb mit abnehmender Tendenz während der gesamten Kulturdauer erhalten. Das k_c-Entwicklungsstadium 2 (5 Blätter) war

ab Mitte/Ende Mai, im Jahr 2013 erst ab Mitte Juni erreicht. Mit dem k_c -Entwicklungsstadium 2 nehmen das Wachstum, der Wasserbedarf und die N-Aufnahme stark zu, bis das Zwiebellaub beginnt zu knicken. Dies erfolgte ab Mitte Juli, im Jahr 2013 erst ab Ende Juli. Die Ernte erfolgt ab Mitte August, im Jahr 2013 sechs bis zehn Tage später als in den Vorjahren.

Tabelle 10: Anbaudaten des Lysimeterversuchs mit Speisezwiebeln

Maßnahme/ Pflanzenentwicklung	2011	2012	2013	Bemerkung
Aussaat	15.3.	12.3.	8.3.	Sorte 'Summit' (Bejo); 200 Korn/m ² ausgesät
k_c 1: Auflaufen	4.4.	2.4.	18.4.	vereinzelt auf 100 Pflanzen/m ²
1. Düngung	15.4.	18.4.	2.5.	50 kg N/ha
2. Düngung	16.5.	14.5.	3.6.	150 kg N/ha
k_c 2: 5 Blätter	24.5.	28.5.	10.6.	
k_c 3: 8 Blätter	7.6.	18.6.	27.6.	
k_c 4: Schlottenknick	15.7.	16.7.	27.7.	
Ernte	16.8.	20.8.	26.8.	
Laub einarbeiten	15.9.	5.9.	16.9.	N-Zufuhr ca. 10-20 kg N/ha/Jahr

Bewässerung

Die Behälter wurden dreimal pro Woche gewogen, um den Wasserverbrauch zu ermitteln. Bei Unterschreiten eines Sollgewichtes der Behälter wurden sie über Tropfschläuche bewässert, die mit ca. 50 Tropfstellen/m² eine flächige Befeuchtung der Bodenoberfläche gewährleisten. Das Sollgewicht entsprach einer Bodenfeuchte von 60 % nFK, wobei mit einer Wasserspeicherfähigkeit von 16 Vol.% = 100 % nFK kalkuliert und zunächst das halbe Behältervolumen, nach der Ausbildung von 5 Laubblättern (k_c Stadium 2) das gesamte Behältervolumen berücksichtigt wurde. Die Berücksichtigung eines anfänglich verringerten Behältervolumens trug der anfänglich geringeren Durchwurzelungstiefe Rechnung. Die Bewässerungsmengen wurden so bemessen, dass die Bodenfeuchte auf 90% nFK angehoben wurde. Es ergaben sich Einzelgaben von anfänglich 13 mm bzw. ab k_c Stadium 2 von 26 mm. Bewässerungsgaben wurden unabhängig von den simulierten Niederschlägen verabreicht. Ab dem Knicken des Zwiebellaubes ("Schlottenknick") wurde nicht mehr bewässert.

Auch die simulierten Niederschläge wurden über die Tropfbewässerung verabreicht, in den Monaten März bis Oktober nach dem festgelegten Regenplan. In den Monaten November bis Februar wirkte der natürliche Niederschlag solange auf die Behälter ein, bis die Monatssumme von Variante 1 nahezu erreicht wurde. Die Differenzen zu den Monatssummen der jeweiligen Versuchsvarianten wurden an frostfreien Tagen verabreicht. Den Versuchen der drei Jahre wurden jeweils die Monate März bis Februar des folgenden Jahres zugeordnet. Im ersten Versuchsjahr 2011 konnte die Niederschlagsimulation erst ab Mitte April beginnen.

Die natürlichen Niederschläge werden durch eine mobile, automatisch gesteuerte Überdachung von den Behältern abgehalten. In niederschlagsfreien Zeiten stehen die Behälter offen.

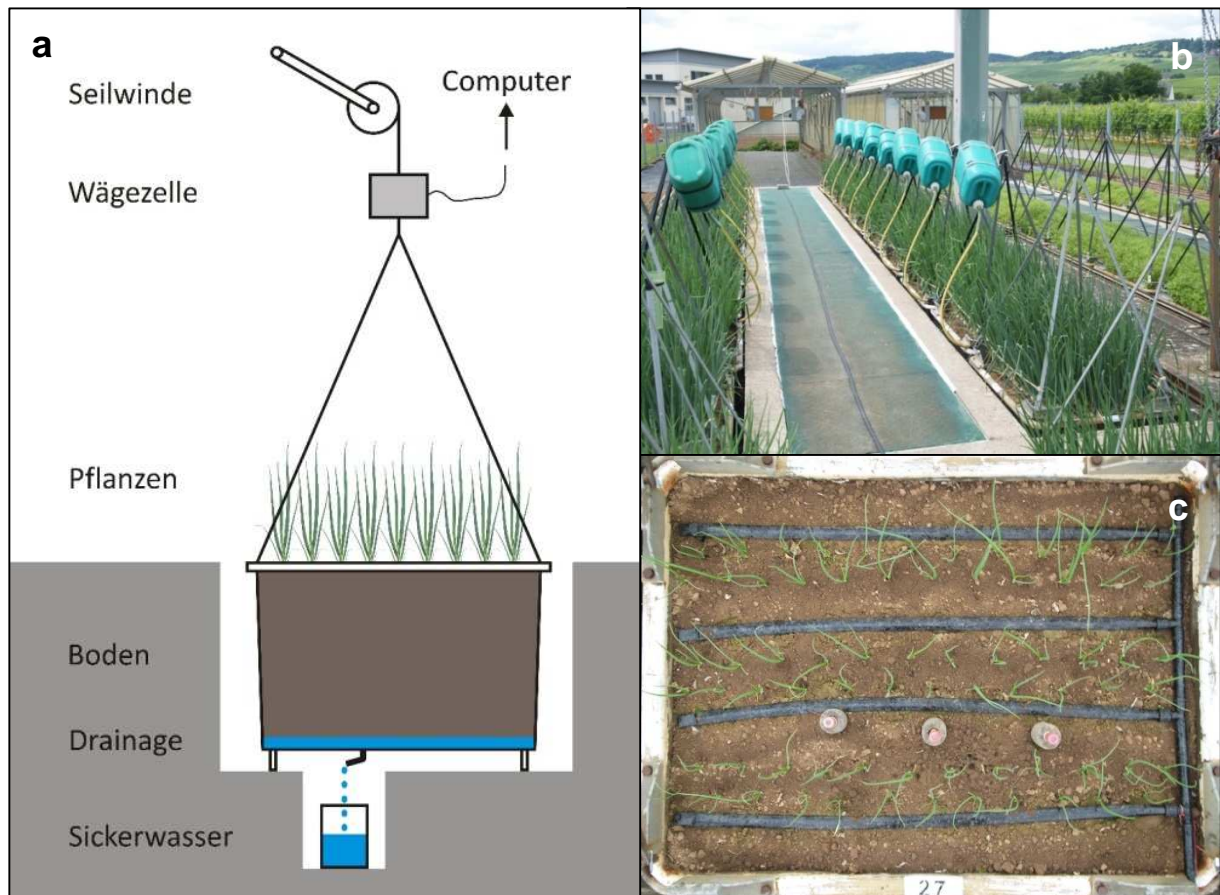


Abbildung 7: a) Schematische Darstellung der Geisenheimer Lysimeter b) Geisenheimer Lysimeteranlage mit Zwiebeln im Jahr 2013. In den aufgehängten grünen Kanistern befinden sich die behälterspezifisch abgemessenen Wassermengen, die über Tropfschläuche verteilt werden. Im Hintergrund sind die fahrbaren, sensorgesteuerten Regenschutzdächer zu sehen. c) Draufsicht Lysimeter mit Zwiebeln und Tropfbewässerung.

Düngung

Zur Nährstoffversorgung wurden nach dem Auflaufen der Zwiebeln 50 kg N/ha und 9 Wochen nach Aussaat 150 kg N/ha als volllöslicher Mehrnährstoffdünger (NPK 16-6-26) über die Tropfbewässerung ausgebracht. Als weitere N-Quelle wurden das getrocknete und zerkleinerte Zwiebellaub im September flach eingearbeitet. Um eine Drainierung des Bodens im Behälter zu vermeiden, konnten keine Bodenproben gezogen werden. Die vorhandenen Nährstoffmengen in den Behältern konnten folglich beim Bemessen der Düngermengen nicht berücksichtigt werden.

4.6.3. Datenerfassung

Während der Entwicklung der Zwiebeln wurden fortlaufend folgende Merkmale ein- bis zweimal pro Woche erfasst: Bedeckungsgrad, Pflanzenlänge, Blattzahl, Durchmesser der Zwiebelbulbe, Blattfarbe und Entwicklungsstadium (BBCH). Im Jahr 2011 erfolgten diese Bonituren an 33 Terminen, 2012 an 40 Terminen und 2013 an 39 Terminen. Saugspannungen in 10, 30 und 50 cm Tiefe wurden mit fest eingebauten Tensiometern dreimal pro Woche gemessen. Während der gesamten Versuchsdauer wurden die Sickerwassermengen sowie die im Sickerwasser enthaltenen Nitratmengen erfasst.

Nach dem Abreifen der Zwiebeln wurde die Frischmasse und die Trockensubstanz sowie der N-Gehalt von Zwiebelbulbe und Laub getrennt ermittelt. Die Durchmesserverteilung der Zwiebeln wurde bestimmt.

Der Wasserverbrauch der Kulturen errechnete sich aus den Gewichtsveränderungen, den Bewässerungs- und Niederschlagsmengen sowie den Sickerwassermengen.

4.7. Statistische Auswertung

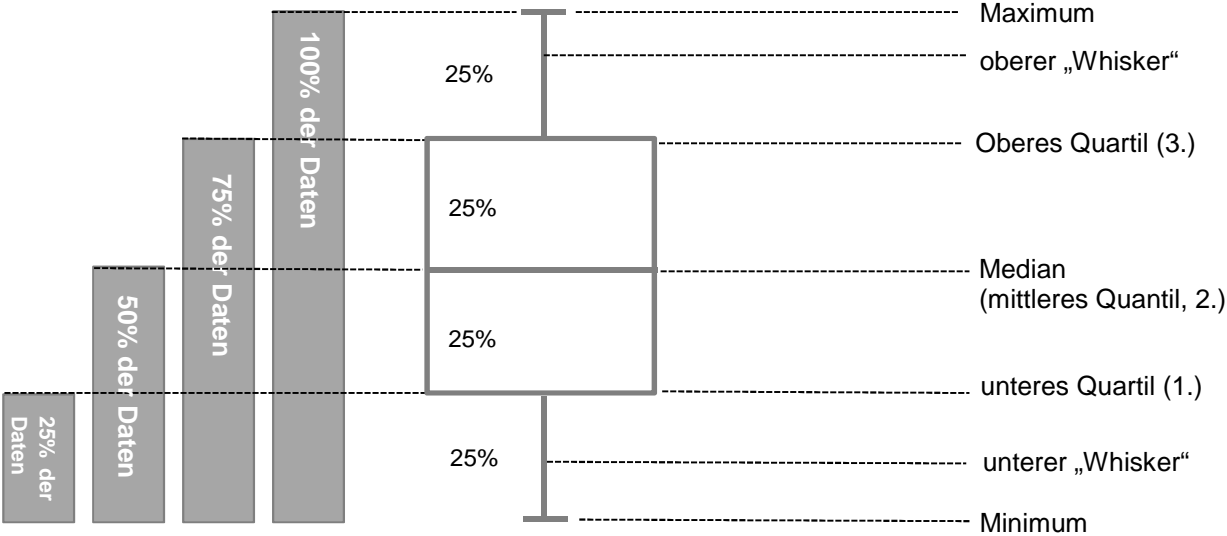
Zur statistischen Analyse der vorliegenden Daten wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) unter Verwendung des Statistikpakets R (R Core Team (2015)) durchgeführt. Diesbezüglich wurde vorab geprüft, ob die Daten die Voraussetzungen der Varianzhomogenität und der Normalverteilung erfüllen. Die Daten wurden mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung sowie mittels Levene-Test auf Varianzhomogenität (Homoskedastizität) geprüft. Lag keine Normalverteilung der Daten vor, wurde ein Kruskal-Wallis-Test herangezogen. Es wird von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ausgegangen.

Paarweise Mittelwertvergleiche erfolgten im Fall der ANOVA mit dem Post-hoc Test Tukey's HSD, im Fall von Kruskal-Wallis mit dem Bonferroni-Test.

Die ermittelten Daten aus dem Lysimeterversuch wurden ebenfalls auf Normalverteilung und Varianzgleichheit geprüft und als einfaktorielle Blockanlage mit vier Wiederholungen varianzanalytisch verrechnet. Wenn die Voraussetzungen dafür nicht gegeben waren, wurde der Kruskal-Wallis-Test angewendet.

Die Darstellung einiger Ergebnisse erfolgt in Form von Boxplots, da diese einige wesentliche Beschreibungsmerkmale einer Verteilung in einem Diagramm darstellen und somit eine grafische Zusammenfassung der Verteilung der Daten ermöglicht, die deren Form, Zentraltendenz und Streuung angibt. Zum anderen eignen sich Boxplots, um mehrere Verteilungen miteinander zu vergleichen.

Ein Boxplot besteht aus einer Box und so genannten Whiskern. Die Box umfasst den Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Dieser Bereich wird durch das obere (75%) und das untere Quantil (25%) begrenzt, sodass die Länge der Box dem Interquartilsabstand (IQR) entspricht. Dieser IQR ist ein Maß für die Streuung der Daten. Der Median teilt die Box, also den Bereich, in dem 50% der Daten liegen. Dessen Lage innerhalb der Box vermittelt somit einen Eindruck von der Schiefe der zugrundeliegenden Verteilung. Die so genannten Whisker stellen die außerhalb der Box liegenden Werte dar und zeigen das Maximum beziehungsweise das Minimum einer Verteilung, sofern diese nicht mehr als das 1,5-fache des Interquartilsabstandes vom Median abweichen. Datenpunkte, die außerhalb dieses Ranges liegen, gelten als Ausreißer und werden als einzelne Datenpunkte dargestellt.



5. Ergebnisse

Zur Beurteilung inwiefern die gemüsebaulich wichtige Region „Hessisches Ried“ zukünftig durch Klimaveränderungen betroffen sein wird, ist eine Auswertung der regionalen und zeitlichen Variabilität der klimatischen Faktoren, die die Wasserverfügbarkeit und die Stickstoffdynamik beeinflussen, erforderlich. Um die Auswirkungen auf den Gemüsebau hinsichtlich des Bewässerungsbedarfs abschätzen zu können, muss der kultur- und schlagspezifische Bewässerungsbedarf ermittelt werden. Dies erfordert im Wesentlichen eine Abschätzung der erforderlichen Beregnungsmenge sowie der Anzahl der Tage mit Beregnungsbedarf.

Es wurden die hierfür relevanten Klimaparameter analysiert. Dabei wurden für die Klimaparameter 30jährige Mittelwerte für die Perioden 1971 - 2000, 2031 - 2060 sowie 2071 - 2100 gebildet. Als Referenzperiode diente der Zeitraum 1971 - 2000; dabei werden die modellierten Klimadaten (und nicht die Beobachtungsdaten) verwendet. In einigen Fällen wurden aus diesen Mittelwerten Differenzen bezogen auf den Referenzzeitraum gebildet, um die entsprechenden klimatischen Veränderungen zu verdeutlichen. Je nach Analyseschwerpunkt wurden mitunter zusätzlich auch monatliche, jährliche oder auf bestimmte Zeitabschnitte bezogene Mittelwerte sowie Summen berechnet. Alle dazu durchgeführten Berechnungen erfolgten mit den vier Modellkombinationen C-CLM (ECHAM5 und HadCM3), REMO (ECHAM5) sowie WETTREG 2010 (ECHAM5) in Kombination mit dem Szenario A1B.

5.1. Klimaparameter

5.1.1. Niederschlag

Die zukünftige Entwicklung des Niederschlags im Zeitraum von 2071 - 2100 zeigt, gemäß den Erwartungen, ein zwischen den Modellen variierendes, aber insgesamt einheitliches Trendbild. Die Summe der jährlichen Niederschläge verändert sich in allen betrachteten Modellen übereinstimmend nur geringfügig (Tabelle 11). Bezogen auf das Flächenmittel für das Hessische Ried ist jedoch von einer Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter auszugehen. Insgesamt betrachtet bewegen sich die monatlichen Niederschlagsdifferenzen innerhalb eines Wertebereichs von ca. ± 10 bis 40% (Abbildung 8). Die zeitliche Niederschlagsvariabilität wird besonders deutlich, da vor allem jahreszeitlich große Unterschiede auftreten (Tabelle 11). Insgesamt betrachtet weisen alle Modellkombinationen darauf hin, dass die Winter mit bis zu +18% feuchter und die Sommer mit bis zu -24% trockener werden, wohingegen für den Frühling Ergebnisse mit unterschiedlichen Vorzeichen aus den Simulationen resultieren. Im Gegensatz dazu sind für den Herbst kaum Veränderungen zu erwarten. Betrachtet man den praxisüblichen Anbauzeitraum von März bis Oktober insgesamt, fällt die erwartete Niederschlagsreduktion im 30jährigen Mittel geringfügig aus.

Tabelle 11: Umverteilung der Niederschläge im Hessischen Ried (Flächenmittel) im Projektionszeitraum 2071 - 2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971 - 2000 aus den modellbezogenen Niederschlagsdaten in Prozent

Modell	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	Vegetationsperiode	
						innerhalb	außerhalb
						(März – Okt)	(Nov – Feb)
C-CLM (ECHAM5)	8,6	- 20	1,6	12,2	1,4	1,4	- 6,7
C-CLM (HadCM3)	- 8,9	- 20,1	- 2,8	11,3	- 4,3	- 4,2	- 15,1
REMO	20,2	- 20,8	0,1	18,2	- 3,5	- 3,5	- 12,5
WETTREG 2010	- 5,9	- 24,1	0,8	6,3	- 4	- 3,9	- 7,9

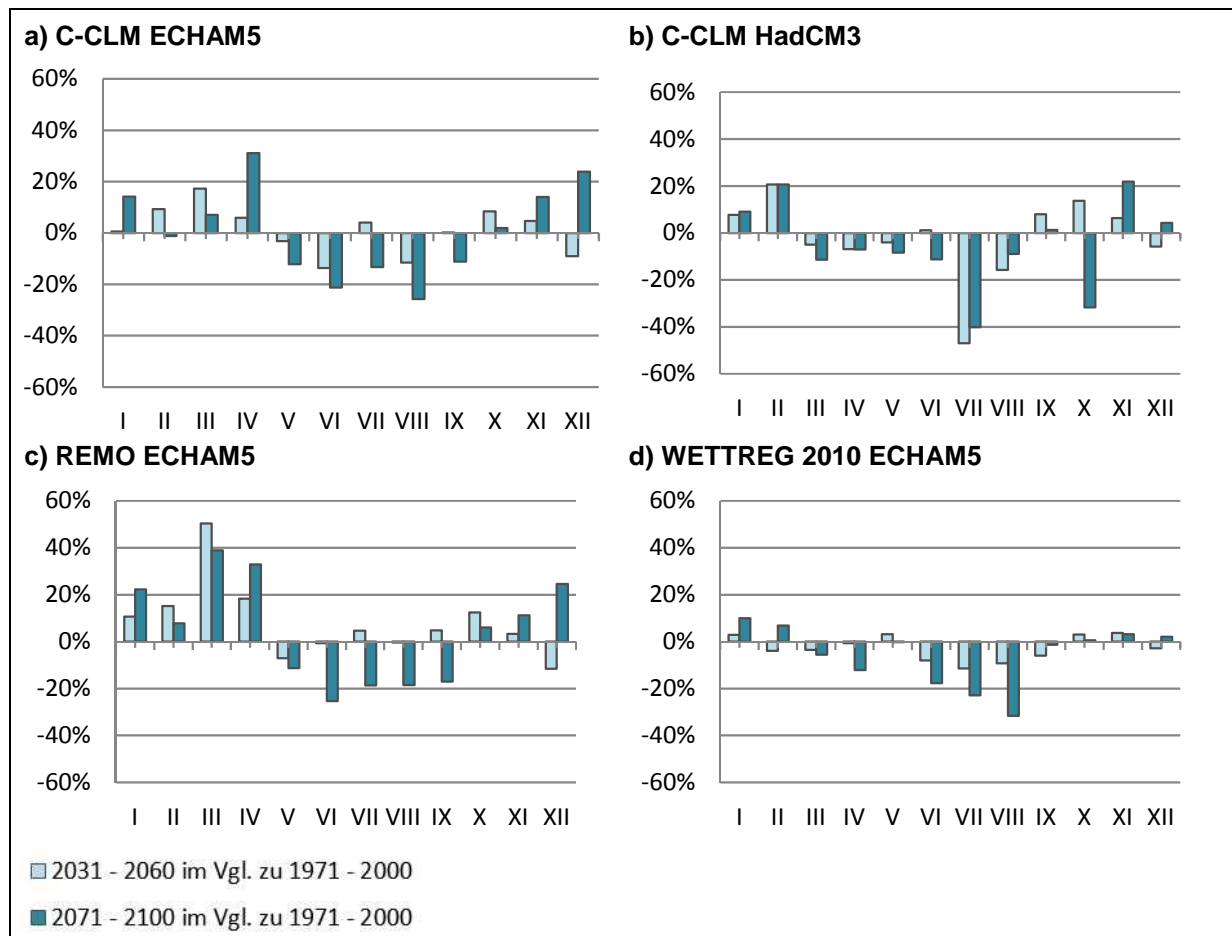


Abbildung 8: Simulierte Veränderung [%] der monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der zukünftigen Perioden 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.

5.1.2. Trockenperioden

Aus landwirtschaftlicher Sicht bestimmt vorrangig die Verfügbarkeit von pflanzenverfügbarem Bodenwasser den Zusatzwasserbedarf, um eine optimale Entwicklung sowie eine Ertrags- und Qualitätssicherung zu gewährleisten. Daher ist die zukünftige Ausprägung niederschlagsfreier Zeiträume, vor allem während der Vegetationsperiode, von großem Interesse. Hierzu wurden Simulationen zur zukünftigen Entwicklung von niederschlagsfreien Zeiträumen (Tage ohne Niederschlag (0 mm)) im Hessischen Ried durchgeführt. Betrachtet wurde die maximale Dauer fortlaufender Trockentage sowie die Häufigkeit des Auftretens von Trockenperioden.

Vorab wurden die Häufigkeitsverteilungen für die vier Modellkombinationen dahingehend näher betrachtet, welche absoluten Maxima generell vom jeweiligen Modell simuliert wurden. Dabei handelt es sich um die jeweils längste Trockenperiode innerhalb der 30jährigen Perioden, die bei Betrachtung aller verwendeten Gitterpunkte bzw. Stationen für das Hessische Ried, ohne Bildung eines Flächenmittels, gefunden wurde. Die Auswertung erfolgte fortlaufend innerhalb der drei Perioden 1971- 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 ohne eine weitere zeitliche Eingrenzung, sprich sowohl Monats- als auch Jahresgrenzen wurden nicht berücksichtigt (bspw. fortlaufend vom 01.01.1971 bis 31.12.2000) (Abbildung 9). Das entspricht somit der absoluten maximalen Dauer einer Trockenperiode innerhalb

der jeweiligen 30jährigen Periode und ermöglicht eine vorläufige, rein qualitative Einschätzung, welche niederschlagsfreien Zeiträume von den verschiedenen Modellen im Allgemeinen simuliert werden. Rein qualitativ deshalb, da den ermittelten Maxima kein zeitlicher Bezug zugeordnet wird – das heißt es wird keine Aussage dazu getroffen, ob diese im Sommer oder im Winter bzw. im anbaurelevanten Zeitraum innerhalb der 30jährigen Periode auftreten.

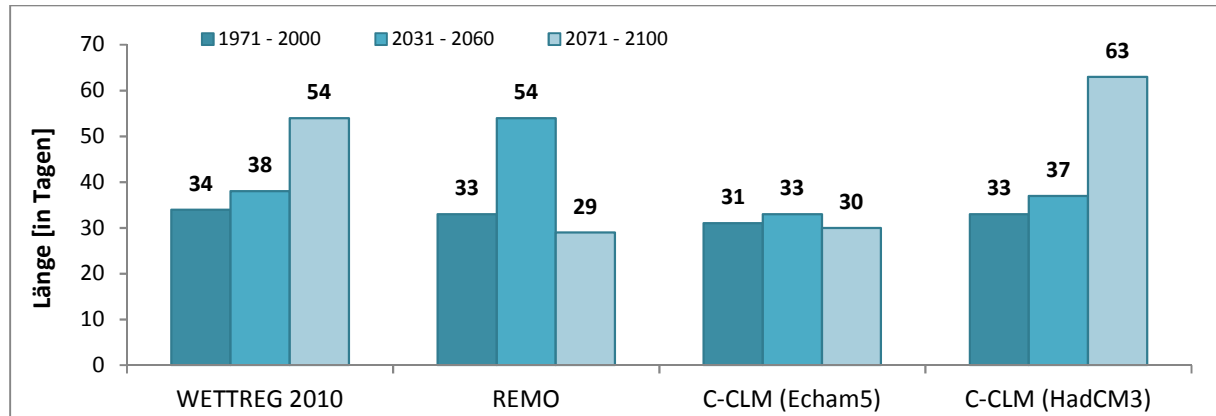


Abbildung 9: Absolute maximale Dauer niederschlagsfreier Zeiträume im Hessischen Ried basierend auf der jeweiligen, modellbezogenen Häufigkeitsverteilung mit WETTREG 2010, REMO sowie C-CLM, jeweils angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3.

Für die Referenzperiode ergeben alle vier Modelkombinationen sehr ähnliche maximale Längen von niederschlagsfreien Zeiträumen. Im zweiten Modellzeitraum (2031 - 2060) wurden von drei Modellen relative moderate Zuwächse von niederschlagsfreien Zeiträumen (um wenige Tage verglichen mit der Referenzperiode) berechnet. Das Modell REMO simulierte eine erhebliche Zunahme auf 54 Tage. In der dritten Zeitperiode ergab sich ein geteiltes Bild. WETTREG 2010 und C-CLM (HadCM3) weisen nahezu doppelt so lange niederschlagsfreie Zeiträume, verglichen mit der Referenzperiode, auf. Dagegen würde sich bei REMO und C-CLM (ECHAM5) sogar die maximale Länge von niederschlagsfreien Zeiträumen gegenüber der Referenzperiode geringfügig verringern. Im Einzelnen ergibt sich wie beispielsweise bei C-CLM (HadCM3) in der langfristigen Zukunft ein niederschlagsfreier Zeitraum von bis zu 63 Tagen. Dies verdeutlicht, dass die Modelle in den zukünftigen Szenarien teilweise niederschlagsfreie Perioden simulieren, die weit über den Zeitraum eines einzelnen Monats hinausgehen.

Für gemüsebaulich relevante Fragestellungen zukünftiger Bewässerung stellt sich die Frage, inwieweit niederschlagsfreie Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode (März bis Oktober) auftreten und inwiefern sich die Häufigkeit solcher Trockenperioden entwickelt. Hierzu müssen hinsichtlich der Trendscharfe stärker zeitlich differenzierte Betrachtungen angestellt werden. Dies machte es erforderlich, die Analyse der niederschlagsfreien Zeiträume auf Monatsbasis durchzuführen.

Dazu wurde zum einen die jeweils längste im Monat vorkommende Trockenperiode im Mittel für die 30jährigen Zeiträume sowie im Flächenmittel für das Hessische Ried ermittelt (Abbildung 10). Zum anderen wurde die Häufigkeit niederschlagsfreier Perioden innerhalb der Vegetationsperiode betrachtet (Abbildung 11). Die Ergebnisse der Simulation für die maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume für das Hessische Ried auf Monatsbasis sind in Abbildung 10 dargestellt. Durch die Einhaltung der Monatsgrenzen und der Betrachtung der einzelnen Monate können detailliertere Tendenzen, insbesondere für den Anbauzeitraum März bis Oktober, dargestellt werden.

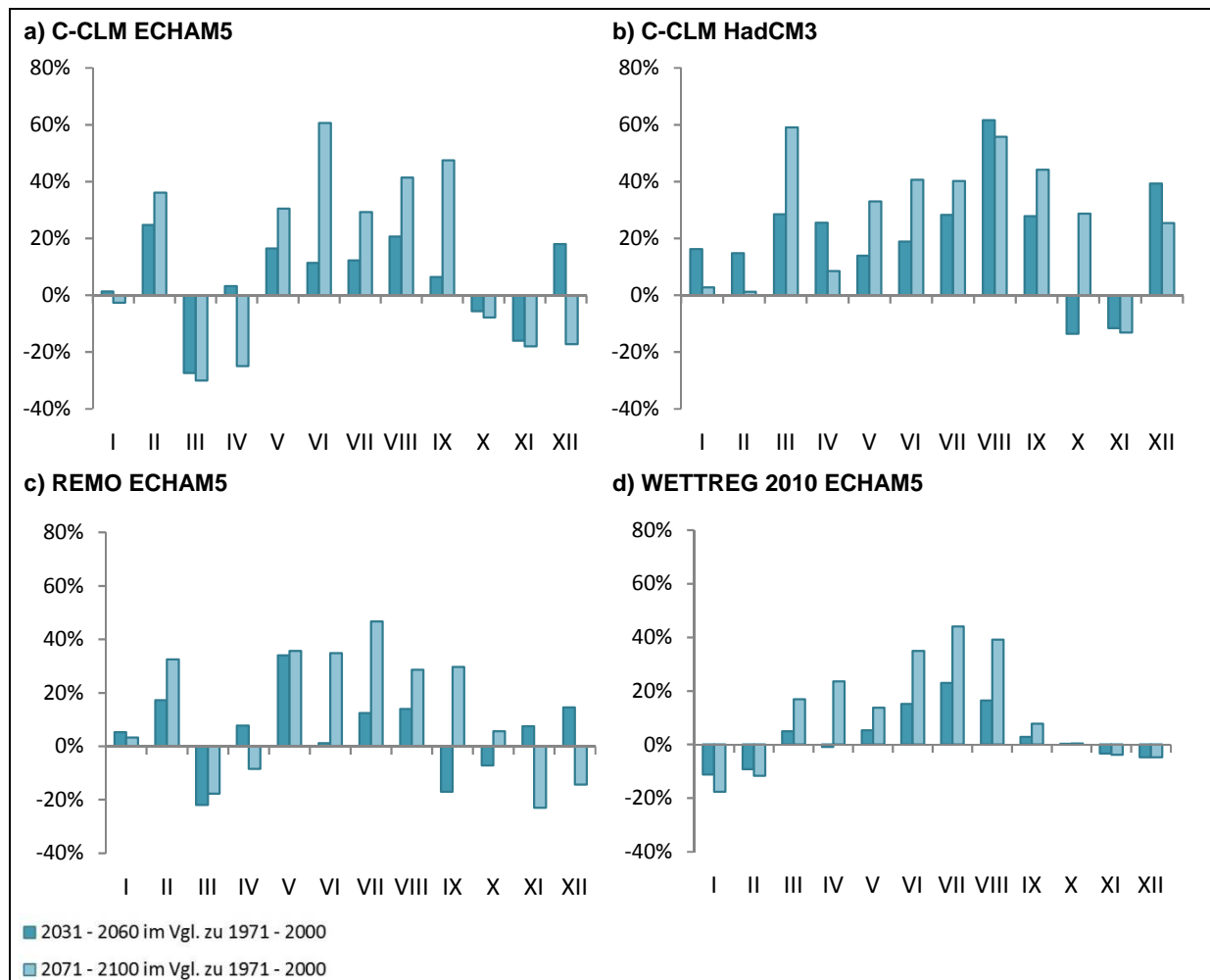


Abbildung 10: Simulierte Veränderung [%] des monatlichen Maximums der Dauer niederschlagsfreier Perioden pro Monat (I bis XII) für die Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 jeweils im Vergleich zur Referenz von 1971 - 2000 für alle Modellkombinationen.

Die Regionalisierungsmodelle C-CLM (ECHAM5) und REMO zeigen eine zunehmende Länge der Trockenperioden für 2071 - 2100 für die Monate Mai bis September. Die Auswertung mit C-CLM, angetrieben durch HadCM3, zeigte für die Monate März bis September ebenso eine Zunahme hinsichtlich der Dauer. Diese Verlängerung beträgt bis zu 60% im Vergleich zur Referenzperiode. Auffällig ist, dass in einigen Fällen sogar eine Verlängerung der niederschlagsfreien Zeiträume in den Wintermonaten simuliert wird. Für das Modell WETTREG 2010 zeigt sich eine ähnliche Tendenz. In den Monaten von März bis September ist zukünftig eine Verlängerung der maximalen Dauer niederschlagsfreier Perioden feststellbar.

Des Weiteren deckt sich die Entwicklung der Dauer niederschlagsfreier Perioden mit der Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter. Nicht nur, dass die Niederschlagsmengen abnehmen, gleichzeitig tritt auch eine Verlängerung der Trockenperioden ein, da die Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag stetig zunimmt.

Hinsichtlich der Häufigkeit zeigen die Modellergebnisse ein sehr unterschiedliches Wertenniveau zwischen den einzelnen Modellen (Abbildung 11).

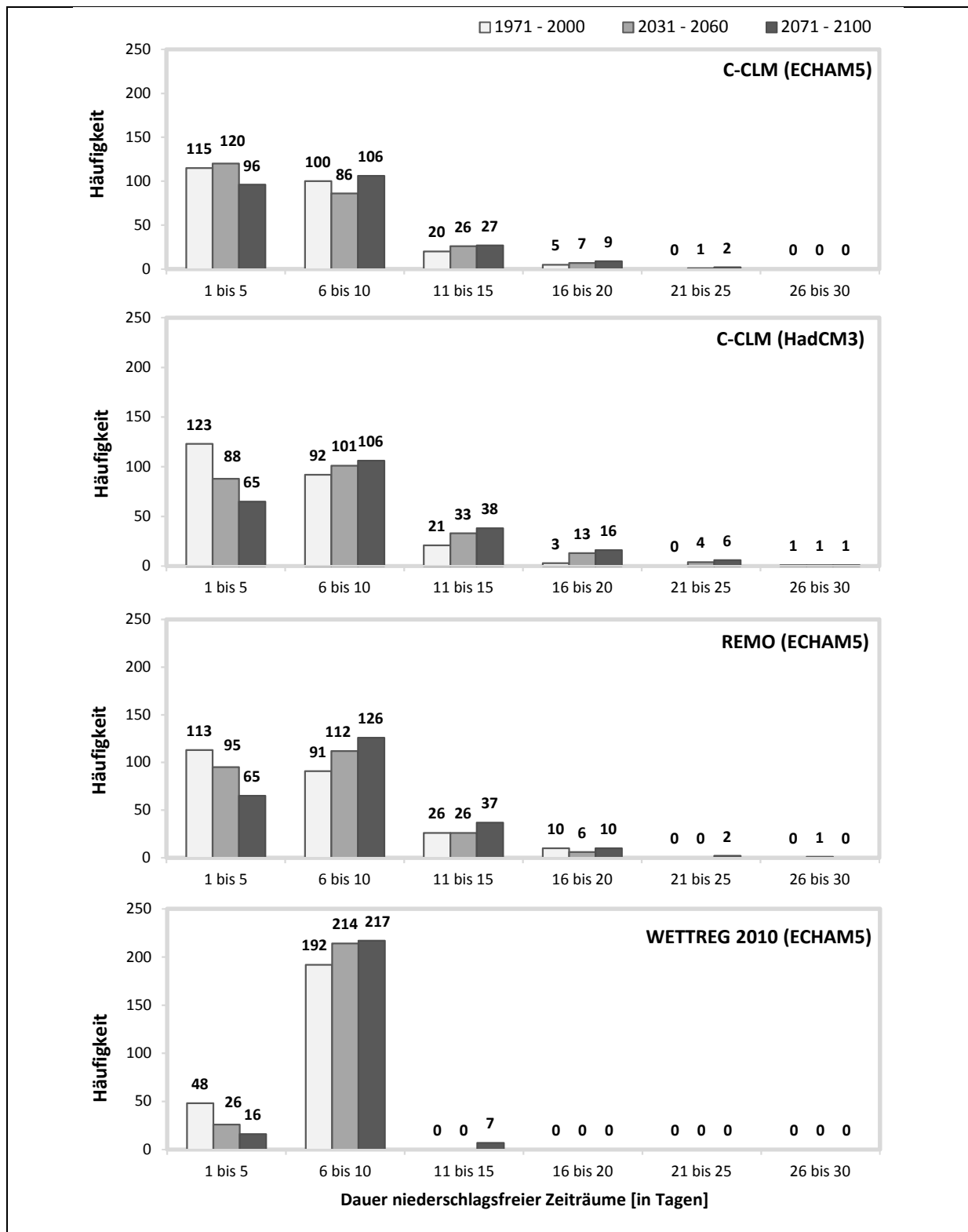


Abbildung 11: Simulierte Häufigkeit der verschiedenen Dauern niederschlagsfreier Perioden unter Einhaltung der Monatsgrenzen (= monatliches Maximum der Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag) für die 30jährigen Perioden 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit WETTREG 2010, REMO sowie C-CLM (jeweils angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3) innerhalb der Vegetationsperiode (März - Oktober) für das Hessische Ried (Flächenmittel).

Bei allen vier Modellkombinationen zeigt sich zukünftig eine Abnahme der Häufigkeit niederschlagsfreier Perioden mit einer Dauer von eins bis fünf Tagen. Das Modell C-CLM, angetrieben durch ECHAM5, simuliert für eine Dauer von sechs bis 10 Tagen eine Abnahme der Häufigkeit in 2031 - 2060 und nur einen leichten Anstieg in 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum. Die anderen drei Modellkombinationen simulieren eine zukünftige Zunahme der Häufigkeit für eine Dauer von sechs bis 10 Tagen. Die Häufigkeit für eine niederschlagsfreie Periode von 11 bis 15 Tagen nimmt bei C-CLM, jeweils angetrieben durch ECHAM5 sowie HadCM3, bis 2071 - 2100 stetig zu. REMO (ECHAM5) und WETTREG 2010 simulieren im Vergleich zu 1971 - 2000 nur eine Häufigkeitszunahme in 2071 - 2100, wobei bei WETTREG 2010 sowohl in 1971 - 2000 als auch in 2031 - 2060 keine niederschlagsfreien Perioden mit einer Dauer von 11 bis 15 Tagen auftraten.

Bei C-CLM (ECHAM5) und REMO (ECHAM5) liegen zukünftig die längsten, in nennenswertem Umfang vorkommenden Trockenperioden bei 16-20 Tagen, bei C-CLM (HadCM3) bei 21-25 Tagen und bei WETTREG 2010 (ECHAM5) bei 11-15 Tagen.

In Hinblick auf die aktuelle Situation,

- der Gemüseanbau im Hessischen Ried erfordert heutzutage bereits einen Zusatzwasserbedarf
- die Modelle simulieren eine Niederschlagsumverteilung sowie längere Trockendauern während der Vegetationsperiode
- länger als 5 Tage andauernde niederschlagsfreie Zeiträume kommen zukünftig häufiger vor
- die Wasserverfügbarkeit für die Landwirtschaft steht in Konkurrenz zu Trinkwasserversorgung, Industrie und Wirtschaft,

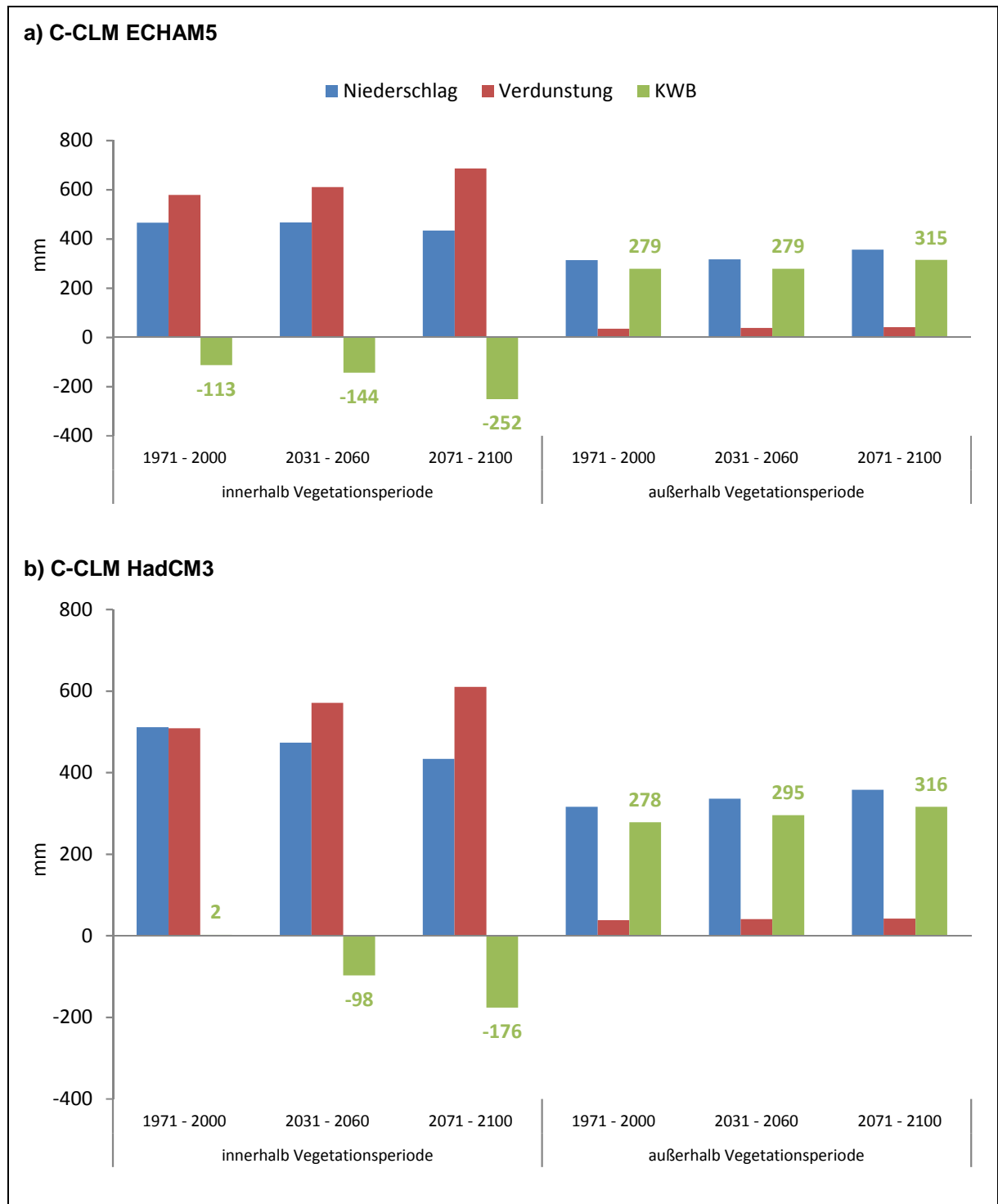
kann davon ausgegangen werden, dass sich die Situation, unter Annahme einer heutzutage in der Praxis üblichen Kulturführung, zukünftig noch verschärft.

5.1.3. Klimatische Wasserbilanz

Die Klimatische Wasserbilanz berechnet sich aus den Niederschlägen abzüglich der potentiellen Verdunstung und dient als ein Indikator zur Abschätzung des Wasserdargebots an einem Standort.

Die Ergebnisse für alle drei Modelle weisen eine negative klimatische Wasserbilanz innerhalb und umgekehrt eine positive Bilanz außerhalb der Vegetationsperiode auf (Abbildung 12). Innerhalb der Vegetationsperioden werden die klimatischen Wasserbilanzen immer stärker negativ. Im Vergleich von 2071 - 2100 zur Referenz 1971 - 2000 weist sie eine signifikante Abnahme von rund 99 mm (REMO ECHAM5), 179 mm (C-CLM HadCM3), 139 mm (C-CLM ECHAM5) bzw. 177 mm (WETTREG 2010 ECHAM5) auf. Im Gegensatz dazu wird außerhalb der Vegetationsperioden mit einer Zunahme der klimatischen Wasserbilanzen zu rechnen sein. Die Zunahme beträgt zukünftig lediglich 29 mm (REMO ECHAM5), 38 mm (C-CLM HadCM3), 36 mm (C-CLM ECHAM5) bzw. 57 mm (WETTREG 2010 ECHAM5).

Die negative klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ergibt sich sowohl aus den geringeren Niederschlägen, während die Verdunstung im Sommer aufgrund vieler Sonnenscheinstunden und damit verbunden hohen Globalstrahlungswerten größer ist. Im Gegenzug dazu führen weniger Globalstrahlung und damit niedrigere Verdunstung sowie die umverteilten, höheren Niederschläge in den Wintermonaten zu einer positiven klimatischen Wasserbilanz.



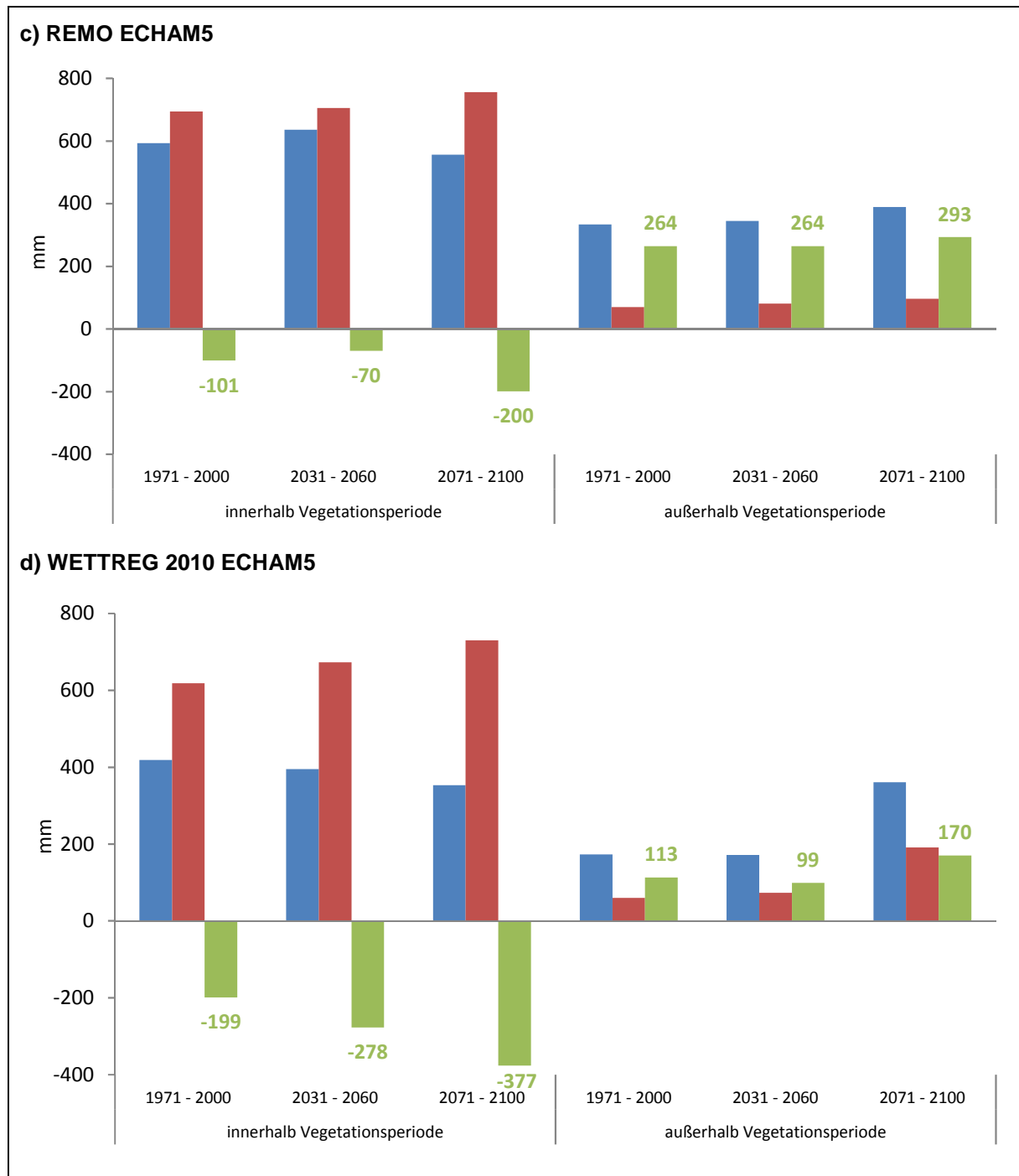


Abbildung 12: 30jährige Mittelwerte der Jahressummen von Niederschlag und Verdunstung sowie daraus resultierende klimatische Wasserbilanz [mm] für das Hessische Ried (Flächenmittel) innerhalb sowie außerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 - 2000 (Referenz) sowie 2031 - 2060 und 2071 - 2100.

5.2. Thermische Vegetationsperiode

Die Simulation unter Anwendung der Formel 1 und 2 (Kapitel 4.3.1) erbrachte in allen Modellkombinationen (Abbildung 13) signifikant längere thermische Vegetationsperioden für die Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 jeweils im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000, was auf eine Verfrühung des Vegetationsbeginns bzw. Verspätung des Vegetationsendes zurückzuführen ist. Bezogen auf den Referenzzeitraum 1971 - 2000 zeigte sich für den Beginn der thermischen Vegetationsperiode in der 30jährigen Periode 2031 - 2060 im Durchschnitt eine Verfrühung um 27 Tage, in 2071 - 2100 sogar um 41 Tage. Das Ende der thermischen Vegetationsperiode hingegen zeigte im Durchschnitt eine Verspätung um 19 Tage für den Zeitraum 2031 - 2060 sowie um 33 Tage für 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000.

Ausgehend von den signifikanten Trends eines früheren Vegetationsbeginns sowie eines späteren Vegetationsendes, ergibt sich eine signifikante Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode. Bei Betrachtung aller Modellkombinationen ergibt sich im Mittel eine Verlängerung von 46 Tagen in 2031 - 2060 sowie von 76 Tagen in 2071 - 2100, jeweils im Vergleich zu 1971 - 2000. Die stärksten Veränderungen treten zum Ende des Jahrhunderts auf, da die Temperaturschwelle von 5°C für den Vegetationsbeginn bereits im Januar überschritten bzw. für das Vegetationsende erst im November/Dezember, also zum Jahresende hin, unterschritten wird. Wie gleichfalls aus der Abbildung 13 ersichtlich wird, verhalten sich alle vier Modellvarianten sehr ähnlich. Die nahe Zukunft wird gegenüber der fernen Zukunft von allen vier Modellvarianten noch einheitlicher dargestellt. Dies bedeutet, dass die modellierten Temperaturveränderungen in allen vier Varianten nah beieinander lagen.

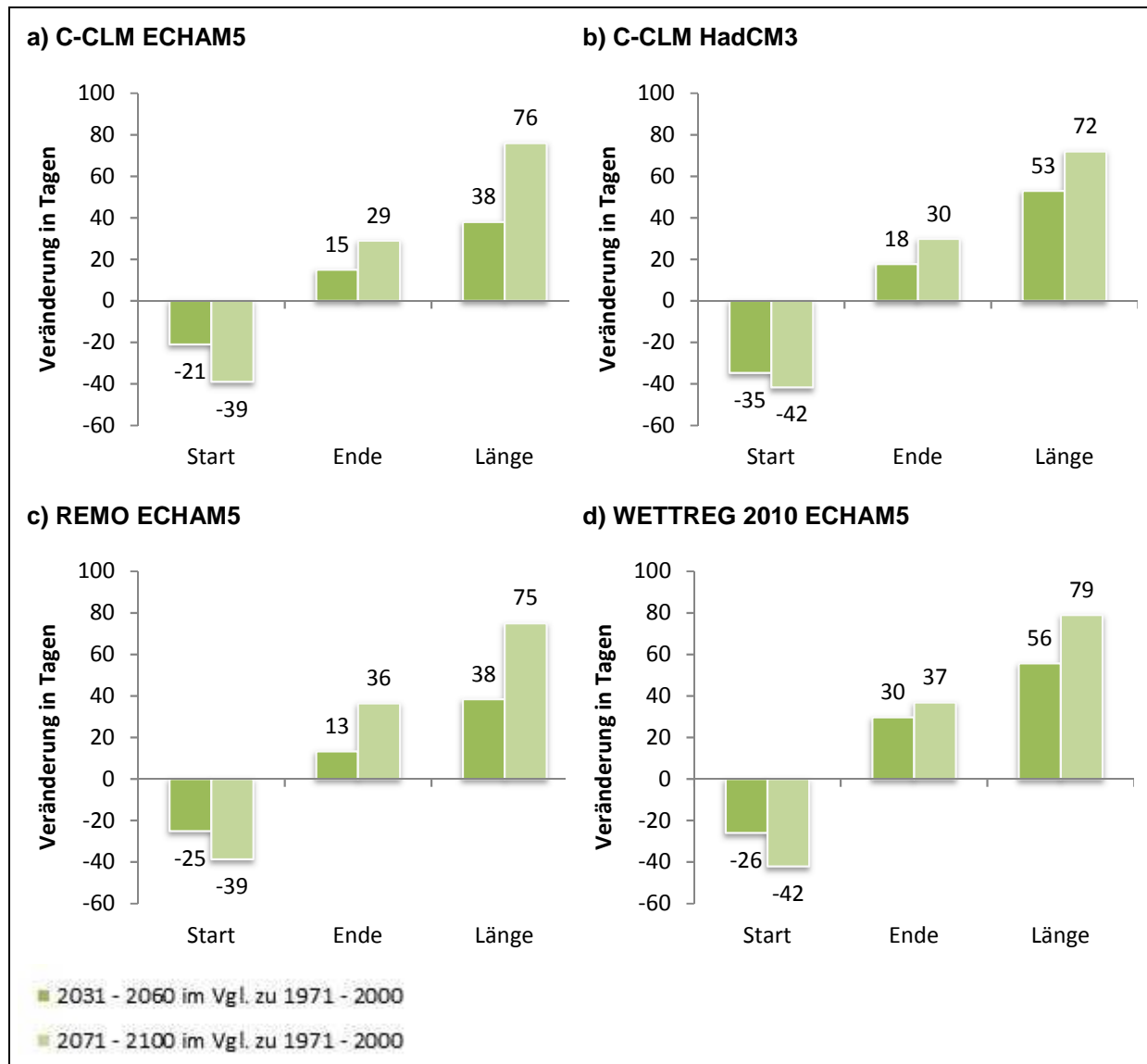


Abbildung 13: Simulierte Veränderung der thermischen Vegetationsperiode für das Hessische Ried (Flächenmittel) für die Modellkombination a) C-CLM (ECHAM5), b) C-CLM (HadCM3), c) REMO (ECHAM5) und d) WETTREG 2010 (ECHAM5) für das Szenario A1B. Dargestellt ist die Veränderung in Tagen für den Start, das Ende und die daraus resultierende Länge der thermischen Vegetationsperiode basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.

5.3. Kulturspezifischer Wasserbedarf

Die in den folgenden Unterkapiteln dargestellten Ergebnisse beschreiben die zukünftige, mit vier Klimamodellen berechnete Entwicklung des kulturspezifischen Wasserbedarfs für die drei Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel. Dabei werden sowohl die Veränderung der einzelnen Entwicklungsstadien und der kulturspezifischen klimatischen Wasserbilanz als auch der daraus resultierende Bewässerungsbedarf hinsichtlich Zusatzwassermenge und Anzahl der Einzelgaben betrachtet. Die Modellrechnungen werden zunächst ohne Verschiebung der Vegetationsperiode durchgeführt (Kap. 5.3.1) und anschließend mit Verschiebung der Vegetationsperiode (Kap. 5.3.2).

5.3.1. Kulturspezifischer Wasserbedarf OHNE Verschiebung der Vegetationsperiode

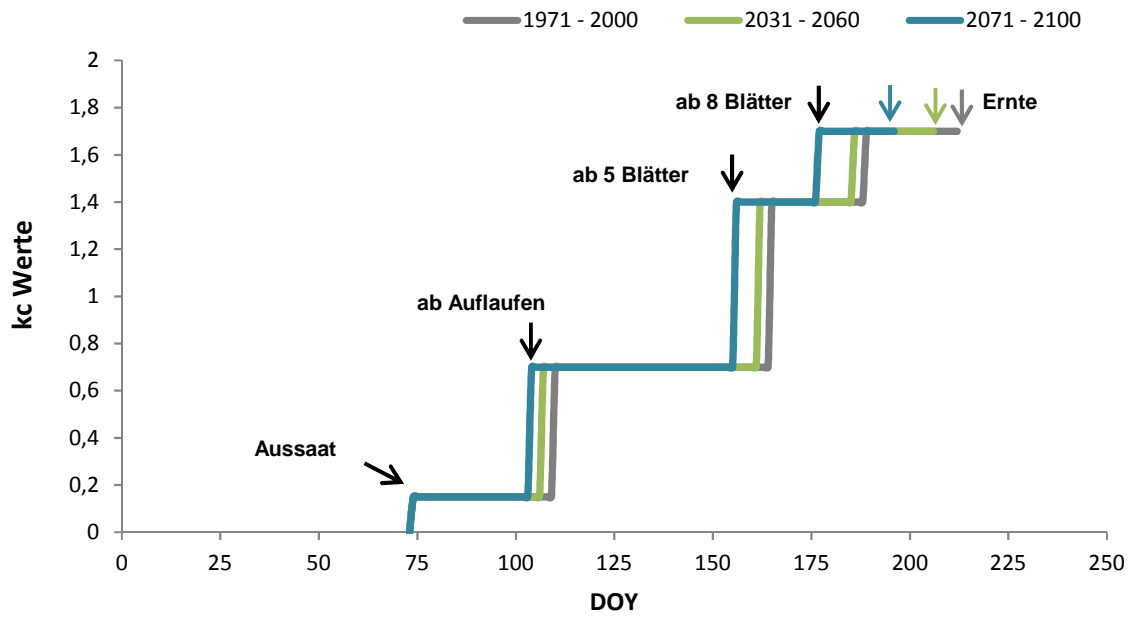
Die Betrachtung der Ergebnisse ohne die Annahme einer zeitlich variierenden Vegetationsperiode ging von festen Aussaatterminen für die jeweilige Kultur aus, wie sie heutzutage in der Praxis üblich sind.

5.3.1.1. Zwiebel

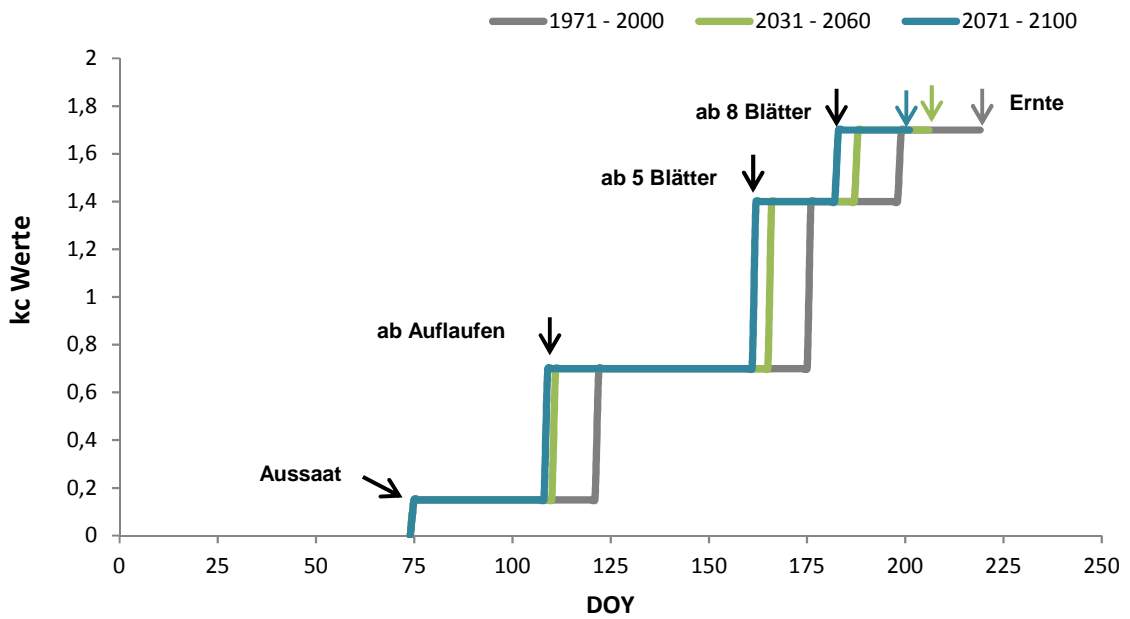
Bei Betrachtung der einzelnen Entwicklungsstufen, die wiederum für bestimmte k_c Werte stehen, wird deutlich, dass in allen Modellkombinationen die Umstelltermine für die einzelnen k_c Werte bezogen auf den hier einheitlichen Aussaattermin am 15. März, für die zukünftigen 30jährigen Zeiträume früher eintreten als es 1971 - 2000 der Fall ist. Im Zusammenhang mit einem simulierten, zukünftigen Temperaturanstieg nimmt die zeitliche Verschiebung, sprich die Verfrühung der Eintrittstermine im Lauf der Kultur bis 2100 immer weiter zu und die Dauer der einzelnen Entwicklungsstadien verkürzt sich. Im Durchschnitt über alle Modellkombinationen ergibt sich bspw. für den Umstelltermin für k_c 1 (ab Auf-laufen) eine Verfrühung von sieben Tagen, für k_c 2 (ab 5 Blätter) eine Verfrühung um 11 Tage, für k_c 3 (ab 8 Blätter) eine Verfrühung von 13 Tagen im Vergleich von 2071 - 2100 zu 1971 - 2000 (Abbildung 14).

Äquivalent zu den früher eintretenden und damit verkürzten Entwicklungsstadien nimmt zukünftig auch die gesamte Kulturdauer ab, wenn die Zwiebeln nach gängiger Praxis Mitte März ausgesät werden. So reduziert sich die Dauer von Aussaat bis Ernte innerhalb des Zeitraumes 2071 - 2100 um durchschnittlich 16 Tage im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 - 2000 (im Mittel über alle Modelle). Dieser Zusammenhang lässt sich durch den simulierten, zukünftigen Anstieg der Temperatur erklären, da die jeweiligen Schwellenwerte (Temperatursumme [$^{\circ}\text{Cd}$]) für den Eintritt des einzelnen Entwicklungsstadiums schneller erreicht werden und sich somit auch die gesamte Kulturdauer verkürzt.

a) C-CLM ECHAM5



b) C-CLM HadCM3



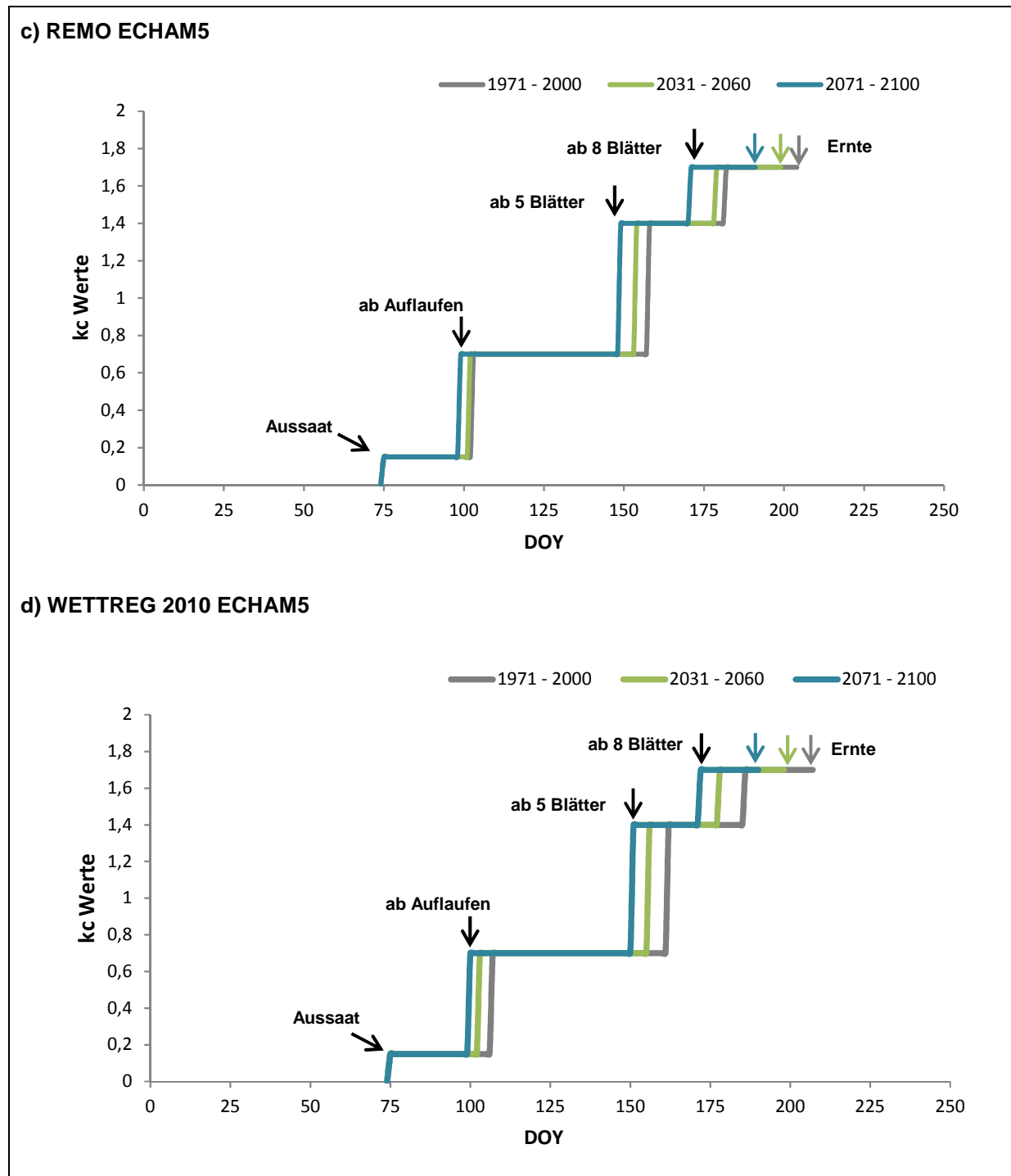


Abbildung 14: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Zwiebel für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Aussaatstermin für Zwiebeln einheitlich jeweils am 15. März.

Basierend auf den Ergebnissen für die zukünftige phänologische Entwicklung der Zwiebel bei unveränderter Vegetationsperiode (März - Oktober) wurden die kulturspezifischen Wasserbilanzen ($KWB = N - ET_0 \times k_c$) ermittelt. Die Simulationen wiesen einheitlich auf eine zum Ende des Jahrhunderts zu-

nehmend negativer werdende KWB hin, da zum einen steigende Temperaturen höhere potentielle Verdunstungswerte begünstigen und sich zum anderen die Niederschläge vom Sommer in den Winter umverteilen. Allerdings waren diese Trends nur in den Modellkombinationen C-CLM (HadCM3) und WETTREG 2010 (ECHAM5) signifikant nachweisbar. Das bedeutet, dass sich im Mittelwertvergleich zumindest eine Tendenz für einen zukünftig erhöhten Zusatzwasserbedarf abzeichnet, falls der Anbau von Zwiebeln trotz des projizierten Klimawandels in der heutigen praxisüblichen Art und Weise beibehalten wird.

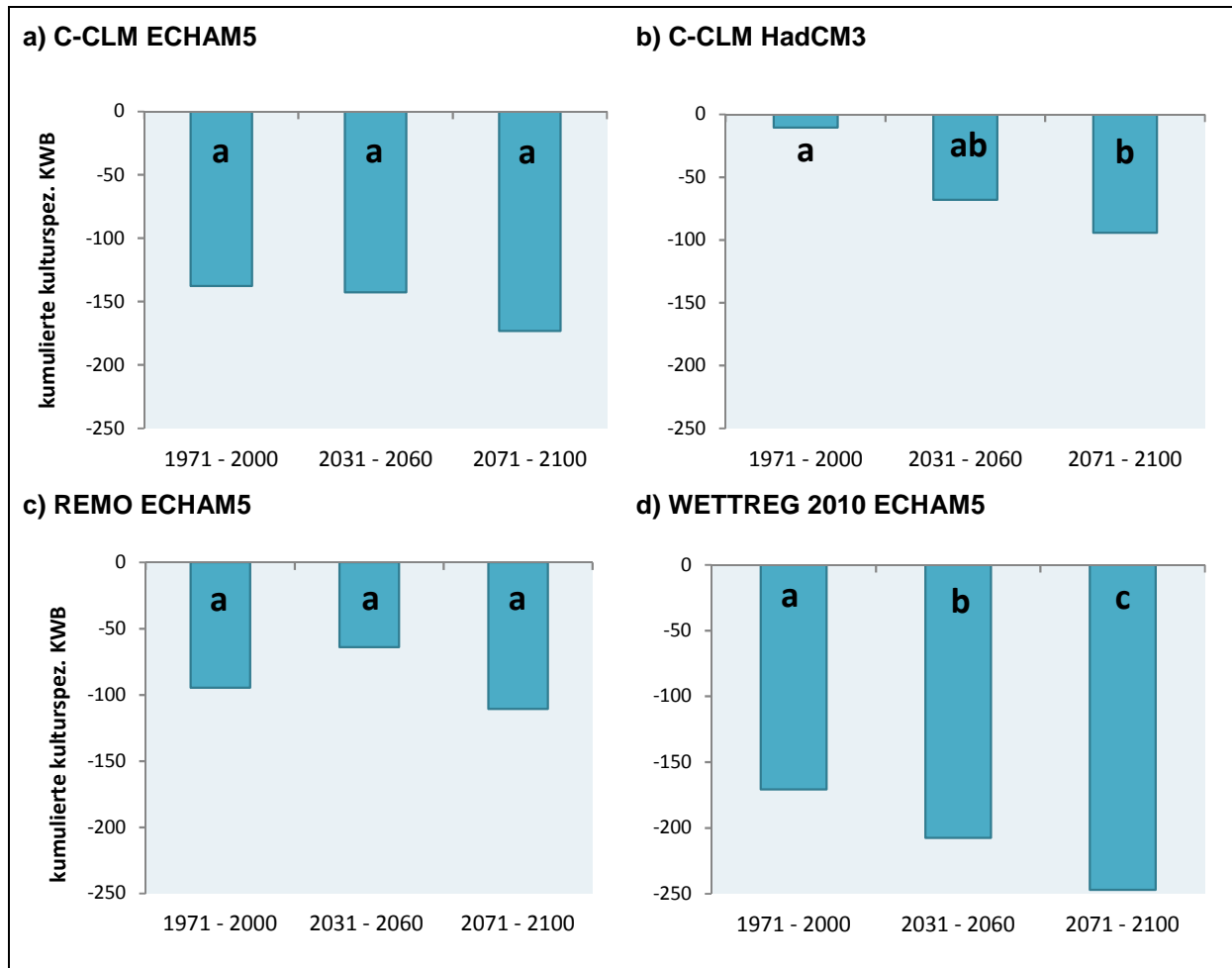


Abbildung 15: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Zwiebeln im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

In Abbildung 15 werden die modellierten klimatischen Wasserbilanzen für Zwiebeln dargestellt. Die deutlichsten Unterschiede wurden hierbei zwischen den Modellvarianten C-CLM HadCM3, mit sehr geringen negativen Wasserbilanzen und WETTREG 2010 ECHAM5 mit den für alle Varianten höchsten negativen Wasserbilanzen simuliert. In der fernen Zukunft werden bei jedem der vier Varianten jeweils die höchsten negativen Wasserbilanzen erhalten. Große Unterschiede gibt es jedoch beim Vergleich der Varianten untereinander (C-CLM HadCM3 mit knapp -100 mm und WETTREG 2010 ECHAM5 mit fast -250 mm).

Auf Grundlage des simulierten zeitlichen Entwicklungsverlaufs der Kultur sowie der berechneten kulturspezifischen KWB kann mit Hilfe des „Bewässerungsmodells nach Geisenheimer Steuerung“ (siehe

Kapitel 4.4) ermittelt werden, welche Bewässerungsmenge und wie viele Bewässerungseinzelgaben insgesamt benötigt werden, um die Zwiebel während der Kulturzeit optimal zu bewässern. Ausgangspunkt für eine Bewässerungsgabe ist dabei das Absinken des Bodenwassergehalts unter 60% nFK. Die Variabilität der einzelnen Ergebnisse wird durch die Ausprägung der Boxplots illustriert.

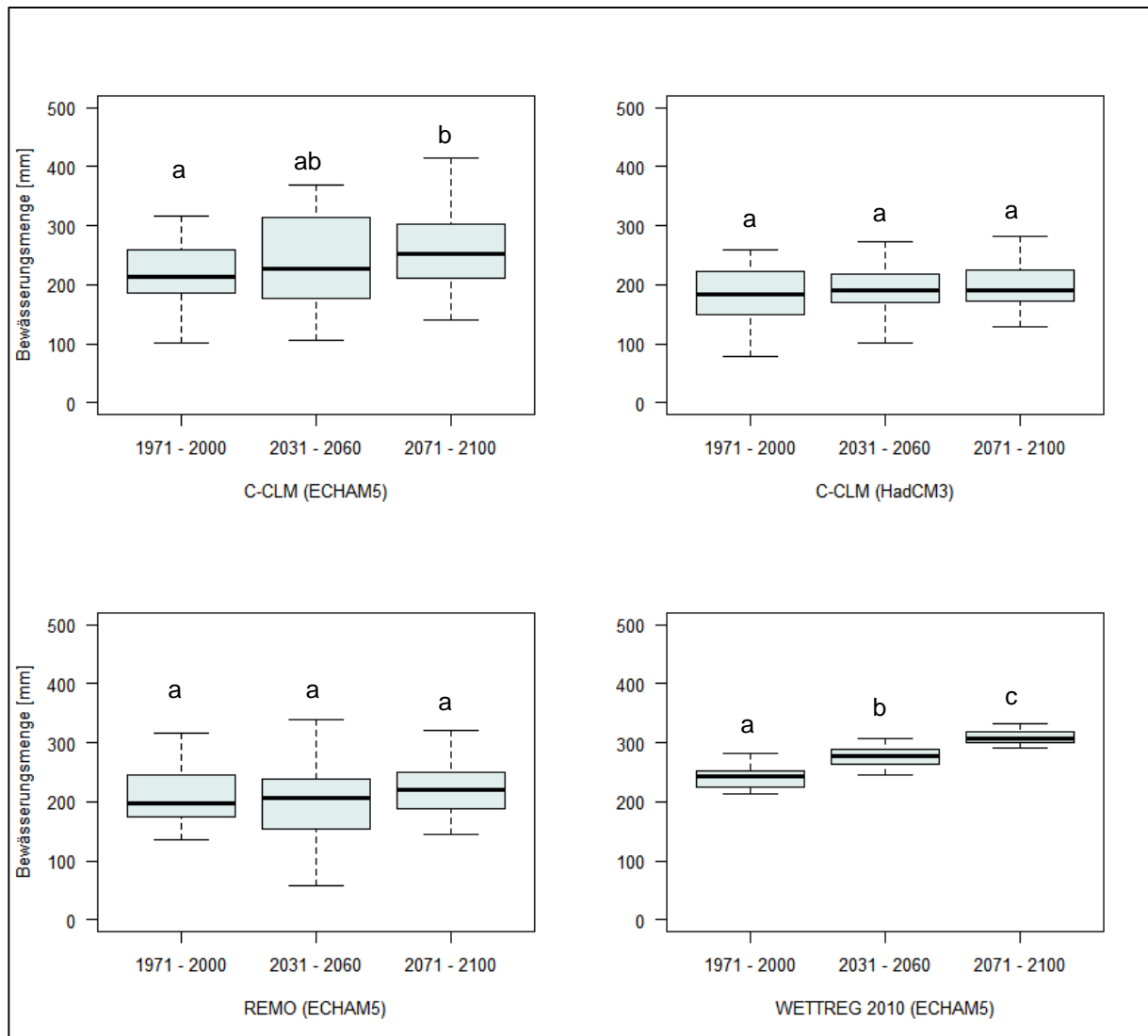


Abbildung 16: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Zwiebeln während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

In Abbildung 16 ist der Bewässerungsbedarf für den Anbau von Zwiebeln, unterteilt nach Modellkombination und den 30jährigen Perioden, als Boxplot dargestellt, um das Verteilungsmuster zu visualisieren. Ausgehend vom Mittelwert über alle Modelle liegt die notwendige Bewässerungsmenge für Zwiebeln in 1971 - 2000 bei 216 mm, in 2031 - 2060 bei 232 mm und in 2071 - 2100 bei 252 mm. Im direkten Vergleich der 30jährigen Mittelwerte der Gesamtbewässerungsmenge von 2071 - 2100 mit der Referenzperiode simuliert C-CLM (ECHAM5) eine Zunahme der Bewässerungsmenge von 217 auf 261 mm, C-CLM (HadCM3) von 198 auf 217 mm, REMO (ECHAM5) von 205 auf 223 mm und WETTREG 2010 von 242 auf 307 mm. Die Modelle simulieren somit zwar eine Zunahme der benötigten Bewässerungsmenge, jedoch ist diese Zunahme nur für die Modelle C-CLM (ECHAM5) und

WETTREG 2010 signifikant nachweisbar. Die minimale Bewässerungsmenge umfasst eine Spannweite von 74 bis 218 mm, die maximale von 281 bis 317 mm in der Referenzperiode 1971 - 2000. Für die zukünftige Periode verschiebt sich das Minimum auf einen Wertebereich von 140 bis 265 mm, das Maximum auf 314 bis 416 mm.

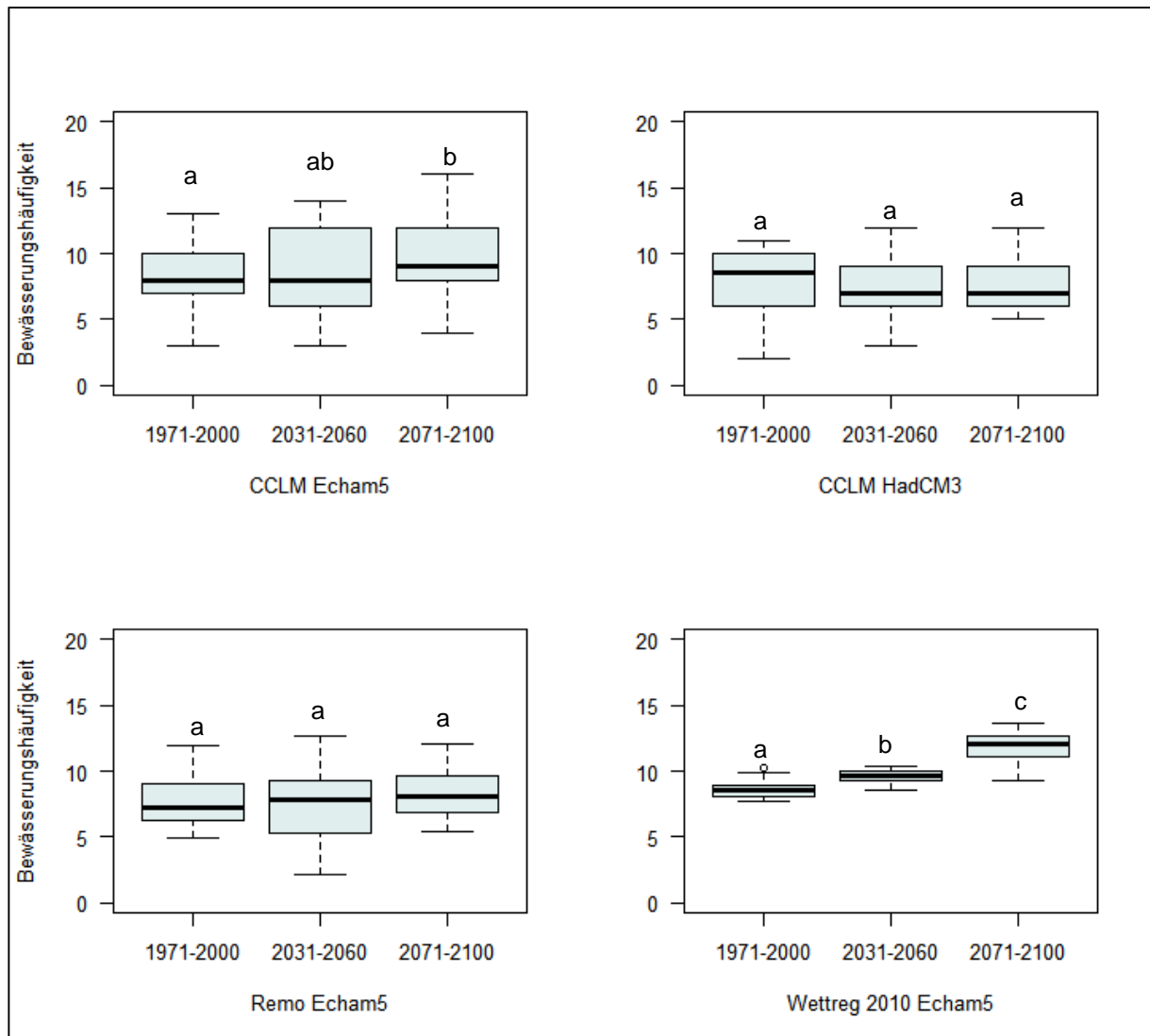


Abbildung 17: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Zwiebel ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

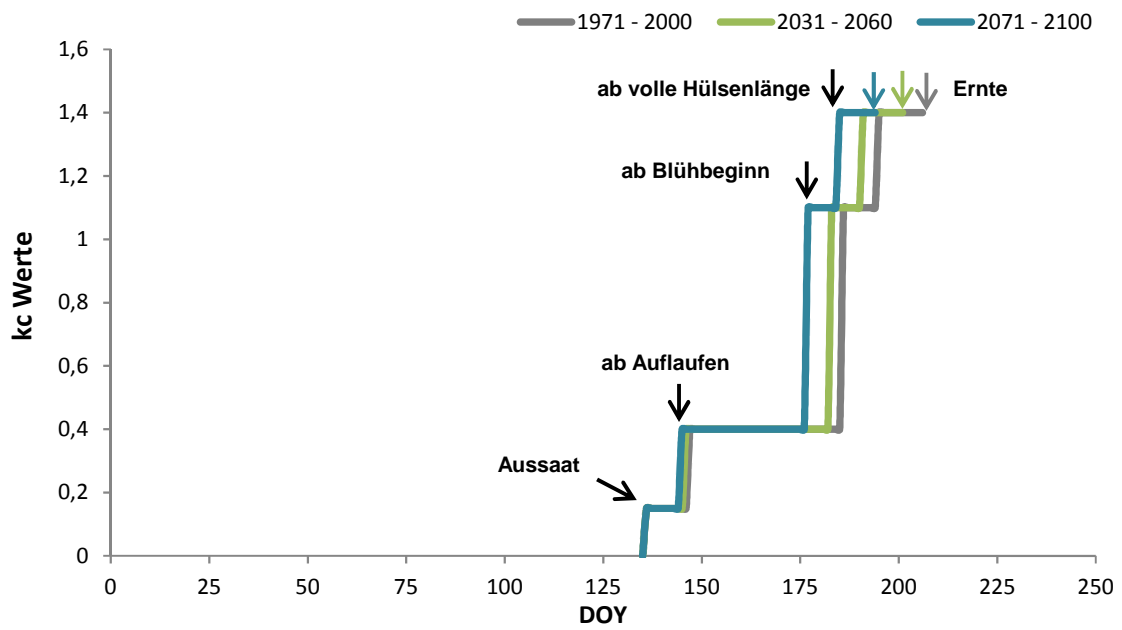
Die Bewässerungshäufigkeit (Abbildung 17) gibt Auskunft über die Anzahl der Bewässerungsereignisse im Verlauf der Kultur. Im Mittel über alle Modelle liegt die Anzahl der Einzelgaben in 1971 - 2000 bei acht, in 2031 - 2060 ebenfalls bei acht und 2071 - 2100 bei neun. Im direkten Vergleich der 30jährigen Mittelwerte der Bewässerungshäufigkeit von 2071 - 2100 mit der Referenzperiode simuliert C-CLM (ECHAM5) einen Anstieg der Einzelgabenanzahl von acht auf zehn und WETTREG 2010 von neun auf elf. In beiden Fällen ist dies signifikant. Im Gegensatz dazu simulieren C-CLM (HadCM3) und REMO (ECHAM5) keine Zunahme hinsichtlich der Einzelgabenanzahl. Die Modelle simulieren somit nur bedingt einen Anstieg der Bewässerungshäufigkeit. Für die Referenzperiode 1971 - 2000 deckt die Spannweite (Minimum und Maximum) aller Modelle einen Wertebereich von zwei bis 13 Einzelgaben ab. In 2071 - 2100 verschiebt sich dieser Wertebereich auf vier bis 16 Bewässerungsereignisse.

5.3.1.2. Buschbohne

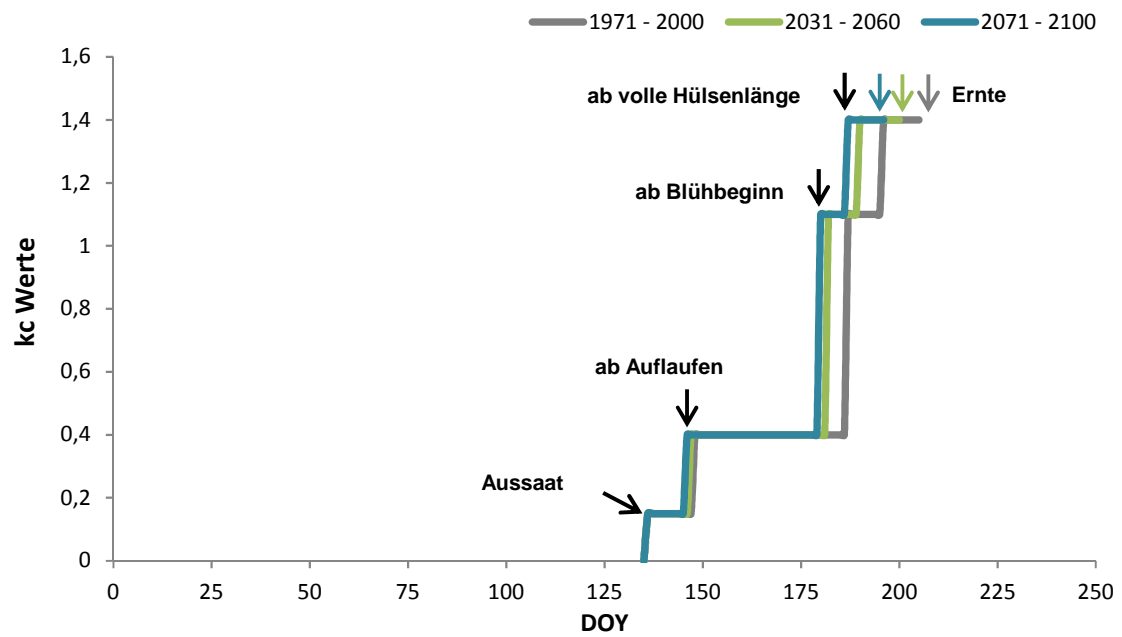
Bezüglich der Entwicklungsstadien bei der Kultur Buschbohne zeigt sich eine zeitliche Verschiebung ausgehend von dem einheitlichen Aussattermin am 15. Mai (135. Tag des Jahres) für alle Modellkombinationen. Generell simulieren die Modelle eine Verfrühung der Eintrittstermine der Entwicklungsstadien in den zukünftigen Perioden 2031 - 2060 sowie 2071 - 2100 im Vgl. zu 1971 - 2000. Allerdings fällt auf, dass unabhängig vom Modell kein bzw. ein vernachlässigbar geringer zeitlicher Unterschied für das Eintrittsdatum des Stadiums Auflaufen (k_c 1) feststellbar ist. Während des weiteren Kulturverlaufs tritt eine Zunahme der zeitlichen Verschiebung für zukünftige Perioden im Vergleich zur Referenz auf.

Betrachtet man die Veränderung der einzelnen Umstelltermine über alle Modelle hinweg, so ergibt sich eine Verfrühung von zwei Tagen für k_c 1 (ab Auflaufen), sieben Tage für k_c 2 (ab Blühbeginn) sowie acht Tage für k_c 3 (ab volle Hülsenlänge) im Vergleich von 2071 - 2100 zu 1971 - 2000 (Abbildung 18). Im Zusammenhang mit dem verfrühten Eintreten der Stadien verkürzt sich die Kulturdauer für die Buschbohne um durchschnittlich zehn Tage in 2071 - 2100 verglichen mit der Referenzperiode. In diesem Fall sind ebenfalls die simulierten, steigenden Temperaturen die Hauptursache für den verkürzten Anbauzeitraum (von Aussaat bis Ernte).

a) C-CLM ECHAM5



b) C-CLM HadCM3



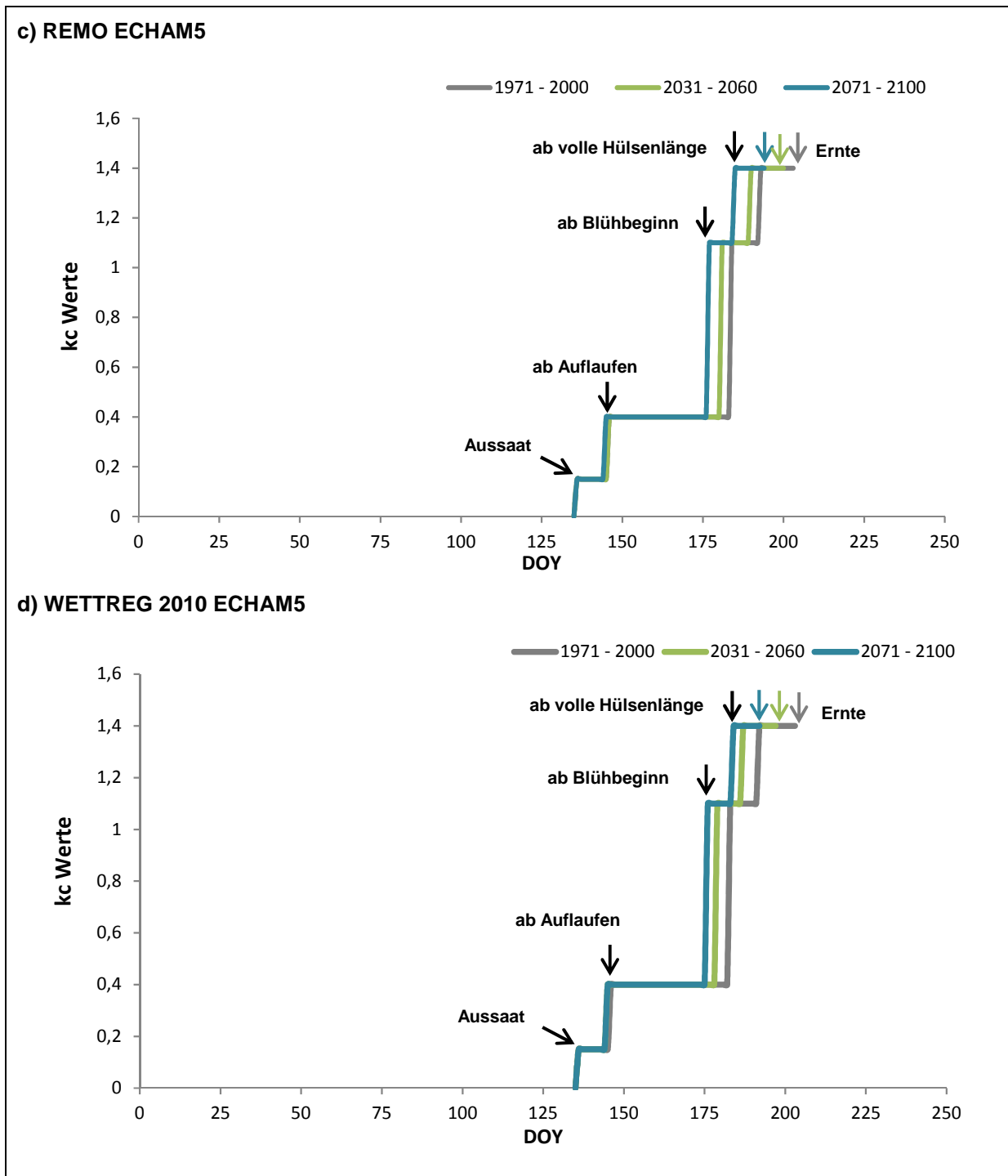


Abbildung 18: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Buschbohne für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Werte bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Aussaattermin für Buschbohnen einheitlich jeweils am 15. Mai.

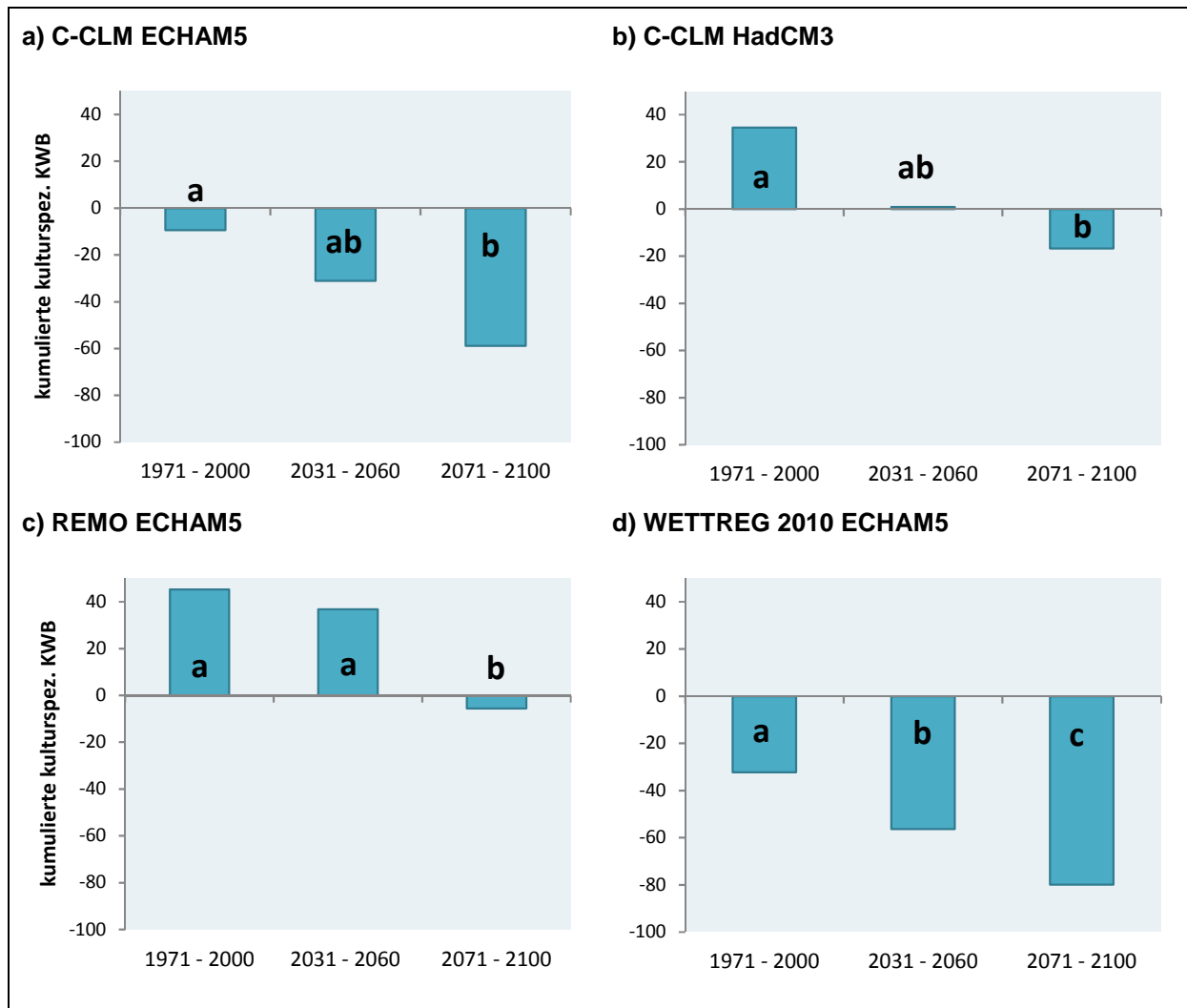


Abbildung 19: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Buschbohne im Hesseschen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (A-NOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Die modellierten klimatischen Wasserbilanzen für Buschbohne sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Modelle variieren sehr stark. Die Modellvarianten C-CLM (ECHAM5) sowie WETTREG 2010 gehen bereits in der Referenzperiode von einer negativen KWB aus, welche zunehmend negativer wird. Im Gegensatz dazu gehen die beiden anderen Modellkombinationen von einer positiven KWB im Referenzzeitraum aus und simulieren nur geringe negative Wasserbilanzen bis Ende des Jahrhunderts. Alle vier Varianten weisen die höchsten negativen Wasserbilanzen für den Zeitraum 2071 - 2100 auf, wobei eine große Bandbreite von - 6 mm (REMO ECHAM5) bis - 80 mm (WETTREG 2010) vorliegt.

Die Auswirkungen auf die Bewässerung für einen Anbau der Buschbohne ohne die Annahme einer sich zeitlich verschiebenden Vegetationsperiode sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt.

Hinsichtlich der Bewässerungsmenge (Abbildung 20) umfassen die Modelle dabei eine Bandbreite von 7 bis 130 mm in 1971 - 2000, von 0 bis 141 mm in 2031 - 2060 sowie von 8 bis 172 mm in 2071 - 2100. Im Mittel über alle Modelle beträgt die Bewässerungsmenge für Buschbohne 63 mm in der Referenzperiode, 73 sowie 85 mm für die zukünftigen Perioden 2031 - 2060 und 2071 - 2100. Betrachtet

man die Veränderung für 2071 - 2100 im Vgl. mit 1971 - 2000 für die Modelle im Einzelnen, so simuliert C-CLM (ECHAM5) eine Zunahme von 67 auf 94 mm, C-CLM (HadCM3) von 60 auf 67 mm, REMO (ECHAM5) von 55 auf 65 mm und WETTREG 2010 von 70 auf 111 mm. Auch in diesem Fall sind die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts nur bei den Modellergebnissen von C-CLM (ECHAM5) und WETTREG 2010 signifikant. Für die Periode 1971 - 2000 erreicht die minimale Bewässerungsmenge Werte von sieben bis 52 mm, das Maximum von 89 bis 130 mm. Zukünftig (2071 - 2100) verschiebt sich das Minimum auf Werte zwischen acht und 93 mm, das Maximum zwischen 126 und 172 mm.

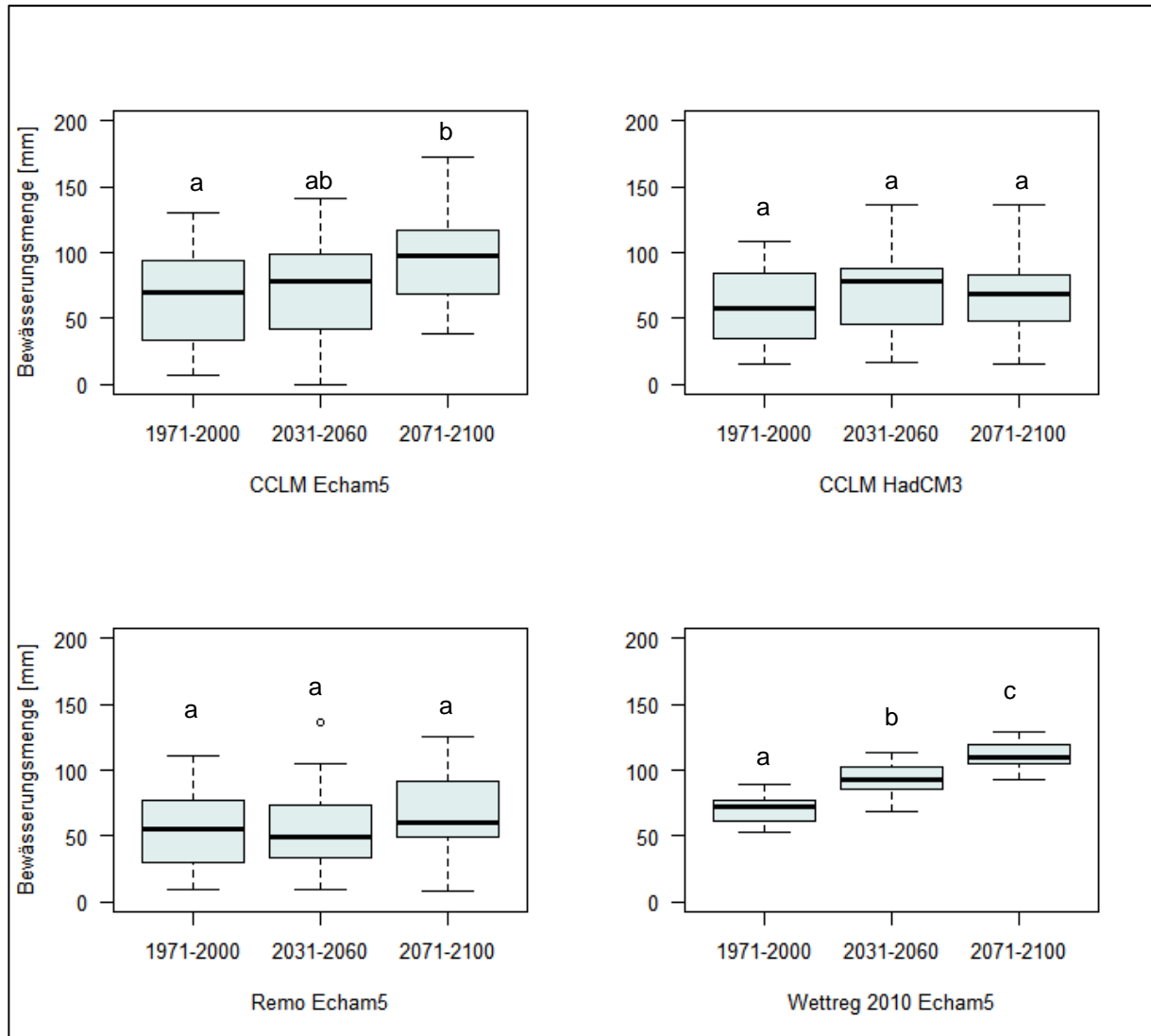


Abbildung 20: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Buschbohne während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Die Bewässerungshäufigkeit für Buschbohne (Abbildung 21) im Mittel über alle Modelle liegt in 1971 - 2000 bei zwei Einzelgaben, in 2031 - 2060 ebenfalls bei zwei und 2071 - 2100 bei drei. Die Bewässerungshäufigkeit verändert sich von 1971 - 2000 bis 2071 - 2100 im Mittel nur bei den Modellen C-CLM (ECHAM5) und WETTREG 2010, und zwar dahingehend, dass eine signifikante Zunahme von 2 auf 4 Einzelgaben simuliert wird. Die beiden anderen Modelle simulieren dahingehend keine Veränderung.

Der Wertebereich verschiebt sich von keine bis fünf Einzelgaben innerhalb der Referenzperiode auf keine bis sieben Einzelgaben in 2071 - 2100.

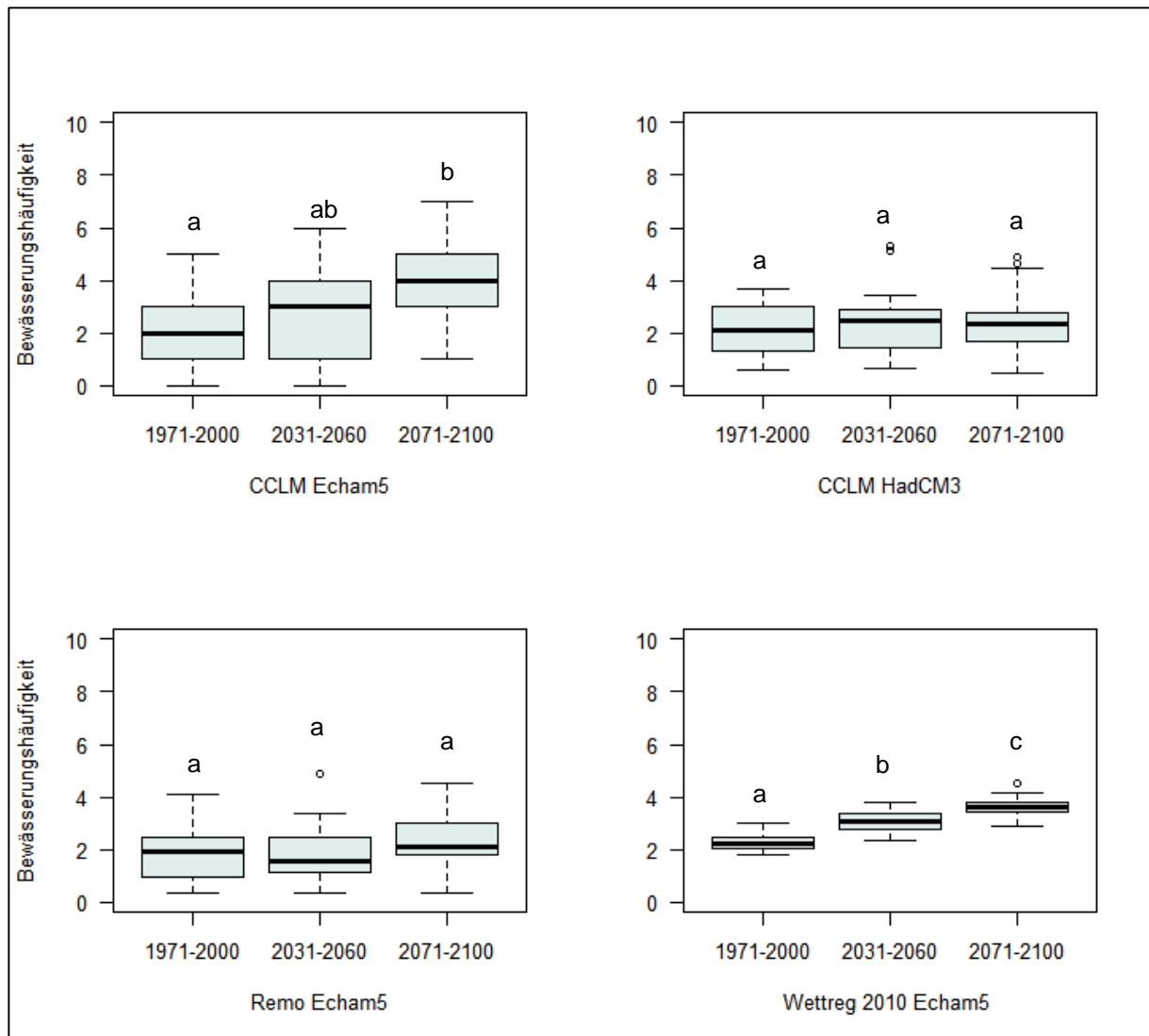


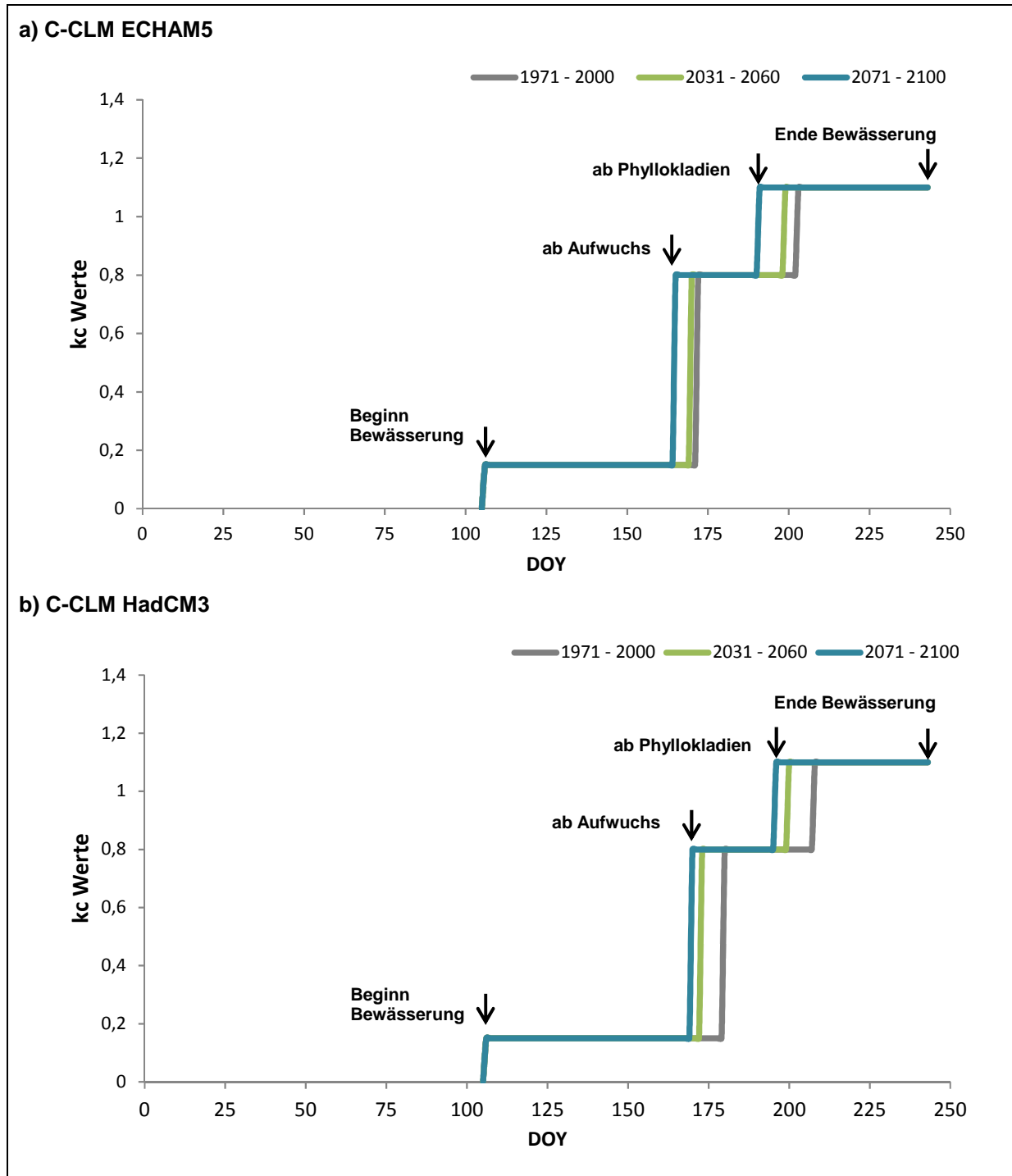
Abbildung 21: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Buschbohne ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

5.3.1.3. Spargel

Bei Betrachtung der Ergebnisse gilt es die Besonderheit zu berücksichtigen, dass eine Bewässerung bei Spargel nach der Ernte erfolgt, da erst mit dem Zeitpunkt des Austriebs der Beginn der eigentlichen Vegetationsperiode einhergeht, in welcher dann eine Bewässerung stattfindet.

Ausgenommen vom Starttermin (Ernte) und dem Endtermin (Ende der Bewässerung), verlagern sich die Termine für die einzelnen Stadien zunehmend früher im Jahr bis 2100. Ähnlich wie bei den beiden anderen Kulturen zeigte sich, dass im Vergleich der 30jährigen Perioden die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Umstellterminen mit zunehmendem Kulturverlauf größer werden. Im Modellmittel verfrüht sich das Eintrittsdatum für das Stadium „ab Aufwuchs“ um acht Tage, für das Stadium „ab Phyllokladien“ um 12 Tage im Vergleich von 2071 - 2100 zu 1971 - 2000 (Abbildung 22). Bezogen auf

den festen Starttermin verkürzen sich demnach die Erntedauer sowie das Stadium für k_c 1 („ab Aufwuchs“) aufgrund der früheren Termine bei allen Modellkombinationen. Mit dem frühen Eintrittsdatum für k_c 2 („ab Phyllokladien“) währt die Entwicklungsphase mit höherem Wasserbedarf länger bis zum Ende der Berechnungszeit. Mit dem höheren k_c Wert gehen potentiell eine höhere Beregnungshäufigkeit und ein gesteigerter Zusatzwasserbedarf einher.



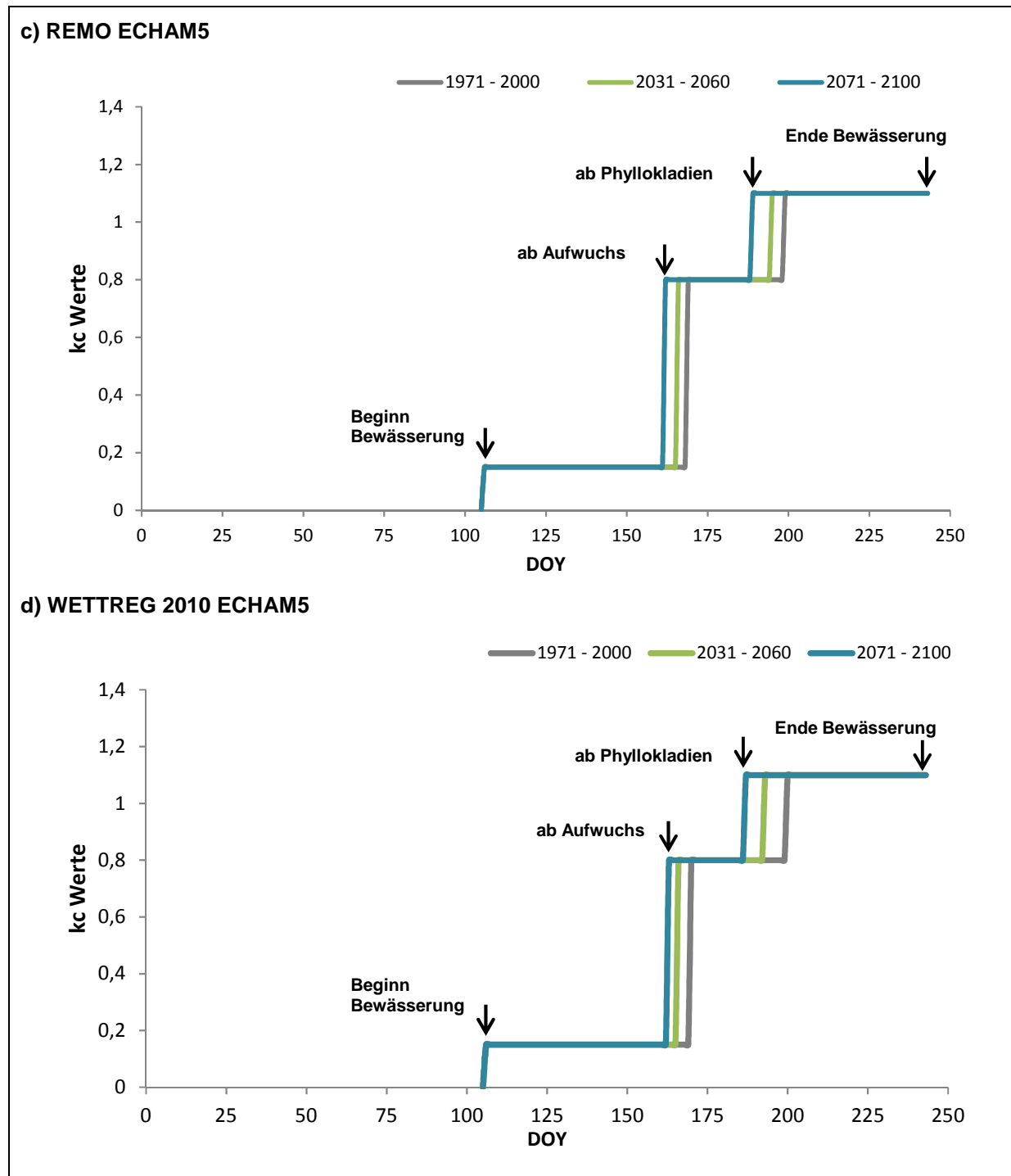


Abbildung 22: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen des Spargels für das Hessische Ried (Flächenmittel). Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c - Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000 unter Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Beginn der Stechzeit für Spargel einheitlich jeweils am 15. April.

In Abbildung 23 ist die kulturspezifische Wasserbilanz der 30jährigen Perioden für Spargel nach Modellen gegliedert dargestellt. Bis auf WETTREG 2010 gehen alle Modelle von einer positiven Bilanz in 1971 - 2000 aus, welche sich dann übereinstimmend zunehmend negativ entwickelt. Die Veränderung

zwischen den Perioden 1971 - 2000 und 2071 - 2100 ist in allen Modellkombinationen signifikant. Die Modellkombinationen C-CLM (HadCM3) und WETTREG 2010 (ECHAM5), weisen bereits für die Periode 2031 - 2060 eine signifikante Abnahme der kulturspezifischen KWB auf, was im Gegensatz dazu bei C-CLM und REMO, angetrieben durch ECHAM5, nicht der Fall ist. Das zukünftige Defizit der kulturspezifischen KWB beträgt maximal bis zu -140 mm.

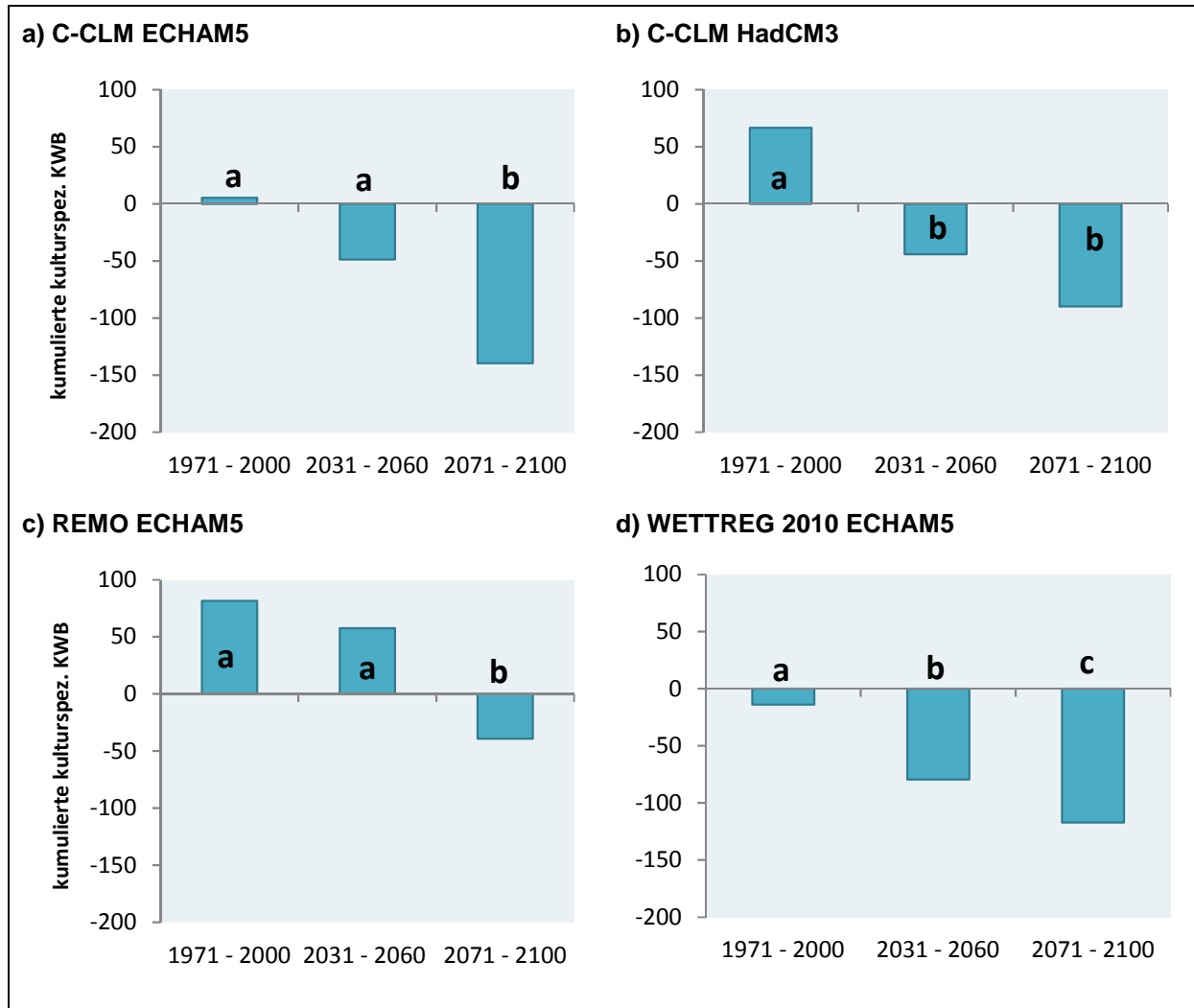


Abbildung 23: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Spargel im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter der Annahme, dass die Vegetationsperiode den Zeitraum von März bis Oktober umfasst. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, $\alpha = 5\%$)

Die Bewässerungsmenge für Spargel ist in Abbildung 24 visualisiert. Sie beläuft sich im Modellmittel auf 109 mm in 1971 - 2000, 164 mm in 2031 - 2060 sowie 223 mm in 2071 - 2100. Liegt der Fokus auf der Veränderung in 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenz für die Modelle im Einzelnen, so ergeben sich Zunahmen hinsichtlich der Gesamtbewässerungsmenge von 109 auf 228 mm bei C-CLM (ECHAM5), von 106 auf 211 mm bei C-CLM (HadCM3) sowie von 98 auf 176 mm bei REMO (ECHAM5) und von 123 auf 277 mm bei WETTREG 2010 (ECHAM5). Die erforderliche Bewässerungsmenge umfasst einen Wertebereich von minimal null bis maximal 226 mm in 1971 - 2000, welcher sich bis 2071 - 2100 auf minimal 10 bis maximal 452 mm verschiebt. Der Anstieg der Bewässerungsmenge beim Vergleich von 2071 - 2100 und 1971 - 2000 ist für alle Modellkombinationen signifi-

kant. Folglich ist unter den gegebenen Anbaubedingungen und der simulierten Entwicklung des Kulturverlaufs zukünftig mit einem Anstieg des Bewässerungsbedarfs für Spargel zu rechnen.

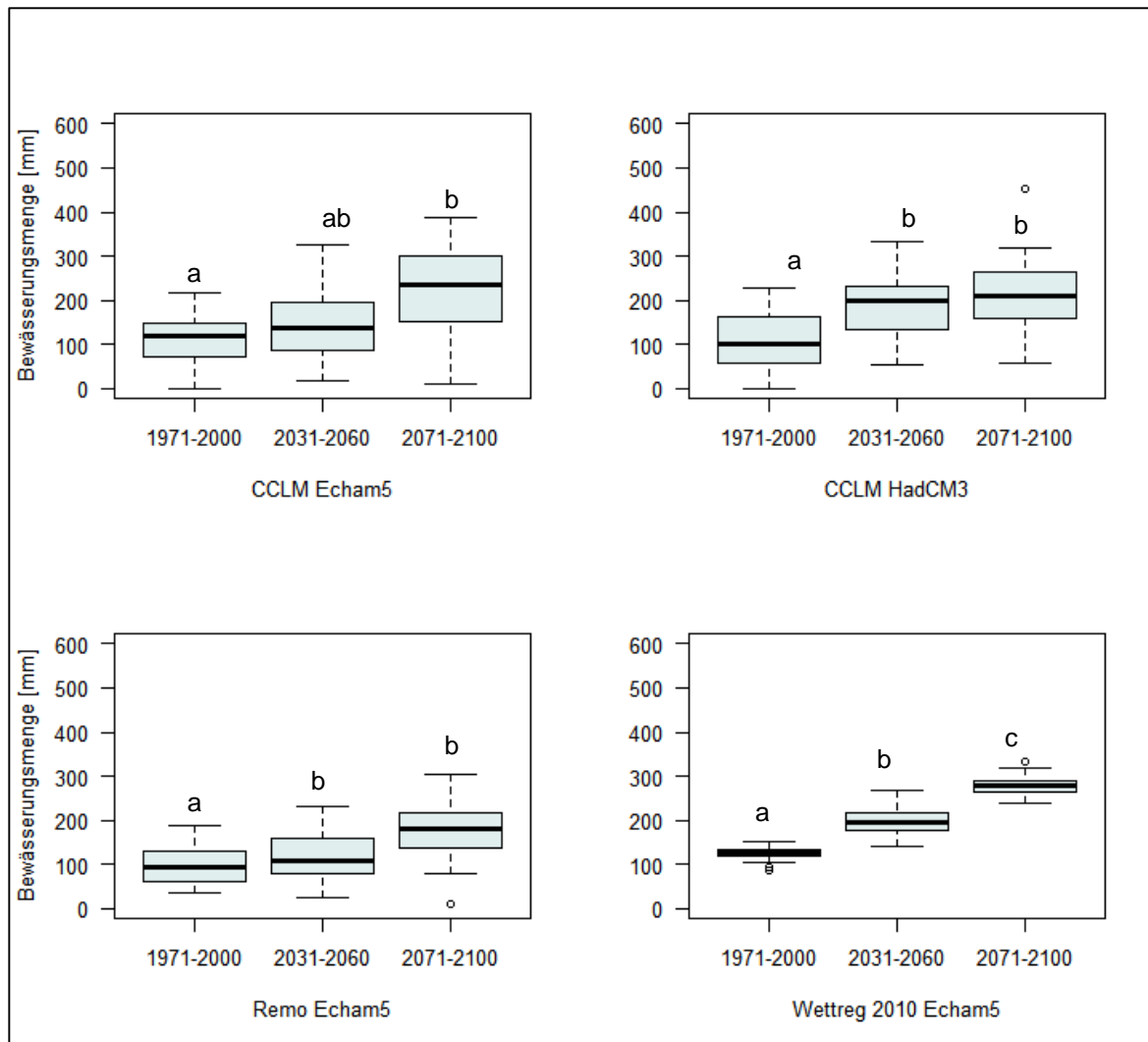


Abbildung 24: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Spargel während der Kultur ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Die Anzahl der Bewässerungsgaben (Abbildung 25) beträgt im Modellmittel drei Gaben in 1971 - 2000, vier Gaben in 2031 - 2060 und fünf in 2071 - 2100. Für die Veränderung der Bewässerungshäufigkeit im Vergleich von 2071 - 2100 mit der Referenzperiode simuliert C-CLM angetrieben durch ECHAM5 einen Anstieg von 3 auf 6 und angetrieben durch HadCM3 von 3 auf 5 Einzelgaben. Die Bewässerungshäufigkeit nimmt bei REMO von 3 auf 4 Gaben zu. WETTREG 2010 simuliert eine Zunahme von 3 auf 6 Einzelgaben. In allen Modellkombinationen ist die Zunahme der Bewässerungshäufigkeit signifikant nachweisbar. Im Referenzzeitraum von 1971 - 2000 deckt die Bewässerungshäufigkeit aller Modelle einen Wertebereich von minimal keiner bis maximal sechs Einzelgaben ab. Im zukünftigen Zeitraum 2071 - 2100 verschiebt sich dieser Wertebereich auf minimal keine bis maximal 12 Einzelgaben.

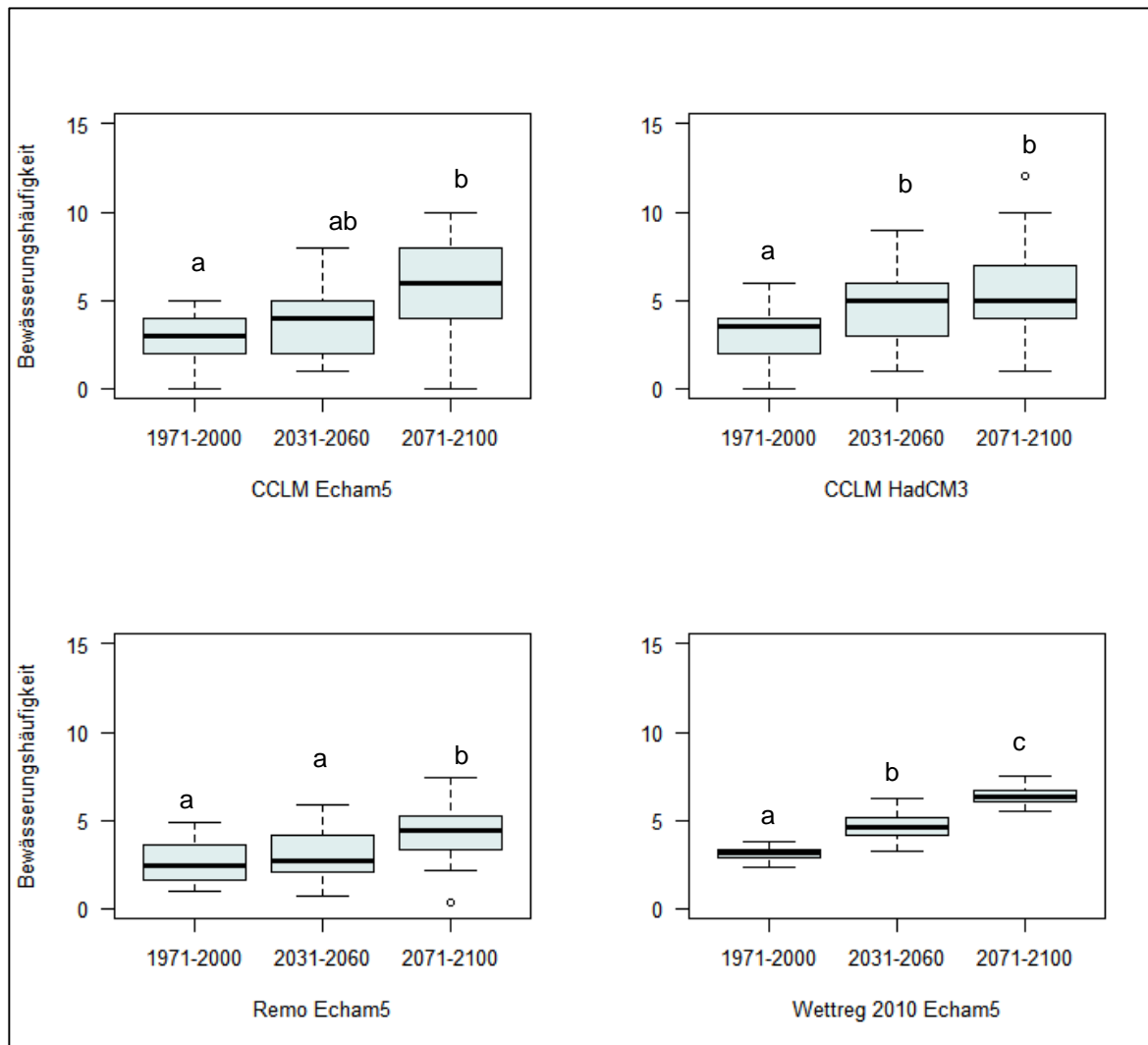


Abbildung 25: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für die Kultur Spargel ohne Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, $\alpha = 5\%$)

5.3.2. Kulturspezifischer Wasserbedarf MIT Verschiebung der Vegetationsperiode

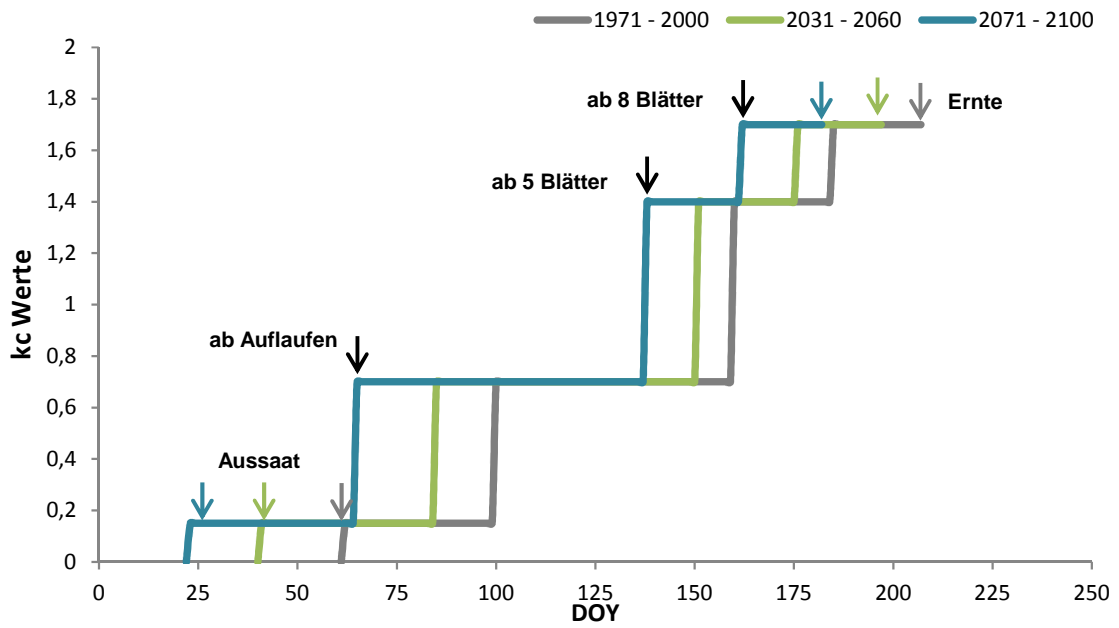
Die Betrachtung der Ergebnisse unter der Annahme einer zeitlich variierenden Vegetationsperiode geht von variablen Startterminen für die jeweilige Kultur aus, basierend auf temperaturabhängigen Schwellenwerten, die überschritten sein müssen, siehe Kapitel 4.4.2.

5.3.2.1. Zwiebel

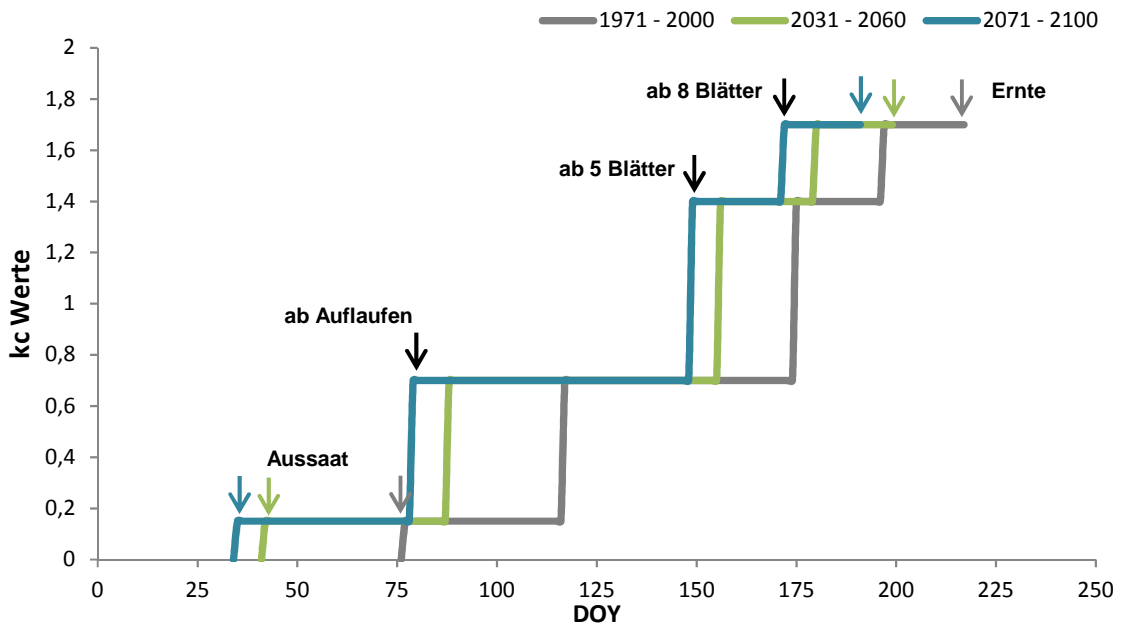
Die Auswertung der k_c -Stufen unter Berücksichtigung einer sich verschiebenden thermischen Vegetationsperiode (Abbildung 26) und eines damit verbundenen, angepassten Zwiebelanbaus zeigten, dass die Erreichung der einzelnen Entwicklungsstadien und damit verbunden die Umstelltermine der einzelnen k_c Werte für die 30jährigen Perioden 2031 - 2060 und 2071 - 2100 im Jahresverlauf wesentlich früher auftreten. Im Modellmittel ergibt sich für den Vergleich zwischen 1971 - 2000 und 2071 - 2100 somit bspw. für den Aussaattermin eine Verfrühung von 42 Tagen. Für k_c 1 („ab Auflaufen“) beträgt diese 38 Tage, für k_c 2 („ab 5 Blätter“) 26 Tage und für k_c 3 („ab 8 Blätter“) 23 Tage. Die Ernte

verfrüht sich im Modellmittel um 27 Tage. In puncto Kulturdauer ergibt sich im Gegensatz dazu durchschnittlich eine Verlängerung um 14 Tage. Bei Betrachtung der zeitlichen Abstände jeweils bezogen auf den Aussattermin fällt auf, dass trotz verfrühter Aussaat die Umstelltermine für die k_c Werte in Zukunft in zeitlich größerem Abstand zur Aussaat stattfinden, das heißt die einzelnen Entwicklungsstadien verlängern sich. Dies betrifft vorwiegend die Phase des Auflaufens sowie das 5-Blatt Stadium. Das lässt sich damit begründen, dass die variierenden Aussattermine der zukünftigen Perioden, die jeweils dem Beginn der thermischen Vegetationsperiode entsprechen, wesentlich früher im Jahr liegen als im Referenzzeitraum 1971 - 2000. Dieser Effekt lässt sich ebenso durch die Abhängigkeit der pflanzlichen Entwicklung von der Temperatur erklären, da sich der Anbauzeitraum analog zur thermischen Vegetationsperiode auf einen früheren Zeitpunkt im Jahr verschoben hat. Zu diesem Zeitpunkt liegen insgesamt betrachtet noch niedrigere Durchschnittstemperaturen und weniger Sonnenstunden vor als es im späteren Verlauf des Jahres der Fall wäre. Die erforderlichen Temperatursummen für den Wechsel in das nächste Stadium werden also erst nach Ablauf einer größeren Anzahl von Tagen erreicht. Die anderen beiden Stadien (k_c 2 und k_c 3) verkürzen sich zukünftig jedoch wieder im Vergleich zur Referenz.

a) C-CLM ECHAM5



b) C-CLM HadCM3



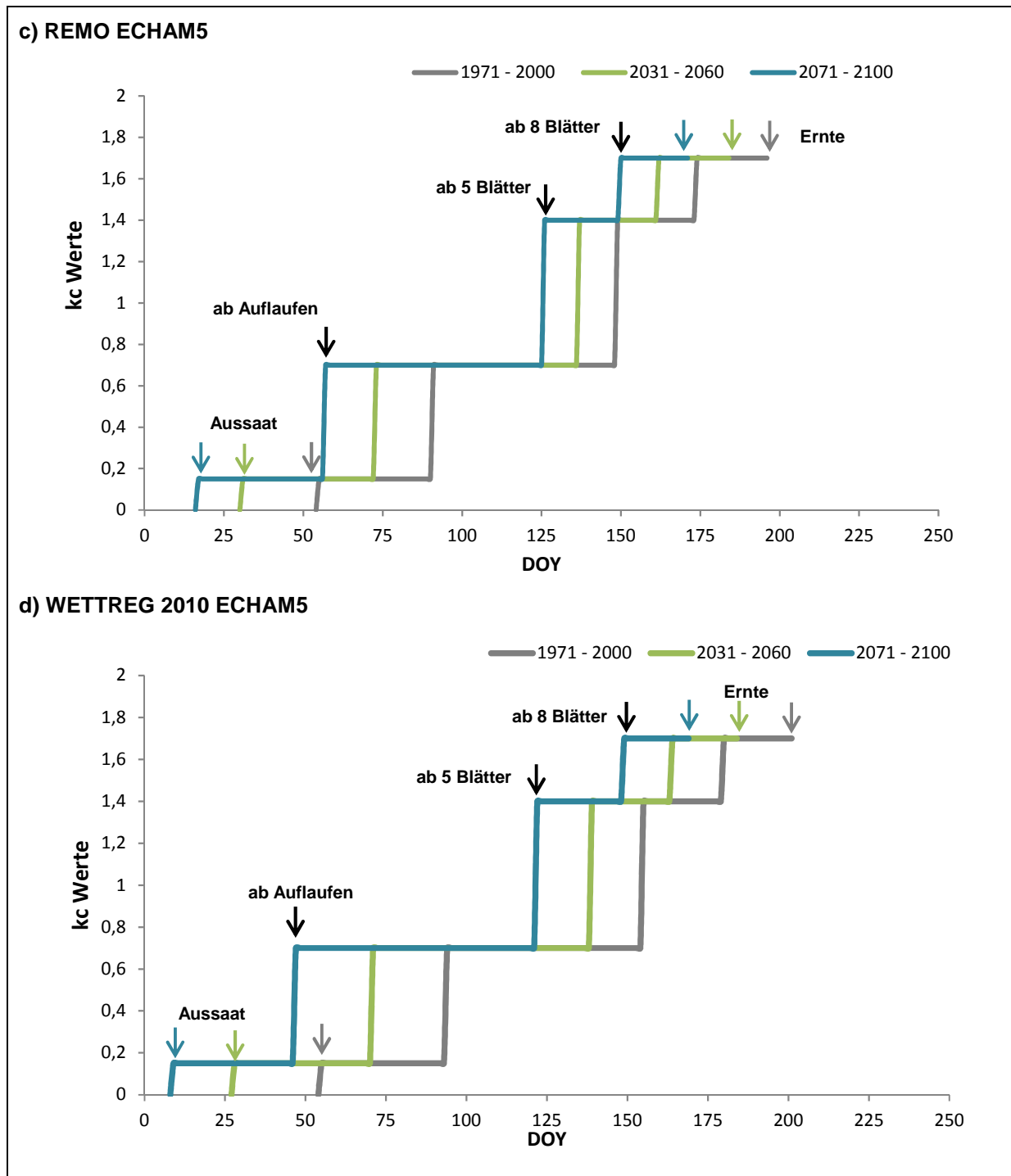


Abbildung 26: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Zwiebel für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c Werte bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.

Betrachtet man zusätzlich die berechnete kulturspezifische Wasserbilanz für Zwiebeln während des variierenden Anbauzeitraumes (Abbildung 27), so zeigen die Simulationen, ausgenommen WETTREG 2010, eine zunehmend positive Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz. Die Modelle gehen dabei alle von einer negativen zwiebelspezifischen KWB innerhalb der Referenzperiode 1971 - 2000 aus.

Für das Modell C-CLM (ECHAM5) verbleibt die KWB im negativen Wertebereich, obwohl das Defizit zunehmend kleiner ausfällt. Die Modelle C-CLM (HadCM3) sowie REMO (ECHAM5) simulieren bis 2071 - 2100 eine Verschiebung der KWB in den positiven Wertebereich. Im Gegensatz dazu simuliert das Modell WETTREG 2010 keine Veränderung der KWB, sondern ein gleiches Defizit für alle drei 30jährigen Zeiträume. Dies liegt daran, dass sich der Anbauzeitraum von Zwiebeln zwar stark verfrüht (siehe Abbildung 26 d), die simulierte Niederschlagsumverteilung am Anfang des Jahres aber nicht so stark ausgeprägt ist, wie es bspw. bei den anderen Modellen der Fall ist (siehe Abbildung 8). Das heißt im Fall WETTREG 2010 steht den zukünftig früher angebauten Zwiebeln vergleichsweise weniger Niederschlag als bei den anderen Modellen zur Verfügung. Im Zusammenhang mit jedoch stark ansteigenden Verdunstungswerten reicht die simulierte Niederschlagsumverteilung nicht aus, um die höheren Verdunstungswerte in der Bilanz dahingehend positiv zu beeinflussen, dass sich zukünftig eine Abnahme des Defizits ergibt. Vielmehr scheint WETTREG 2010 die Veränderungen der Niederschlagsumverteilung und der Verdunstung über die Zeit dahingehend zu simulieren, dass sich der Einfluss der Veränderung beider Größen auf die KWB auszugleichen scheint.

Die statistische Auswertung ergibt, dass nur das Modell REMO eine signifikante Veränderung der KWB für 2071 - 2100 im Vgl. zur Referenz simuliert. Es gibt zwar für die anderen dynamischen Modelle eine gewisse Tendenz, dass die KWB mit zunehmender Zeit ein geringeres Defizit aufweist, doch dies lässt sich statistisch nicht signifikant belegen.

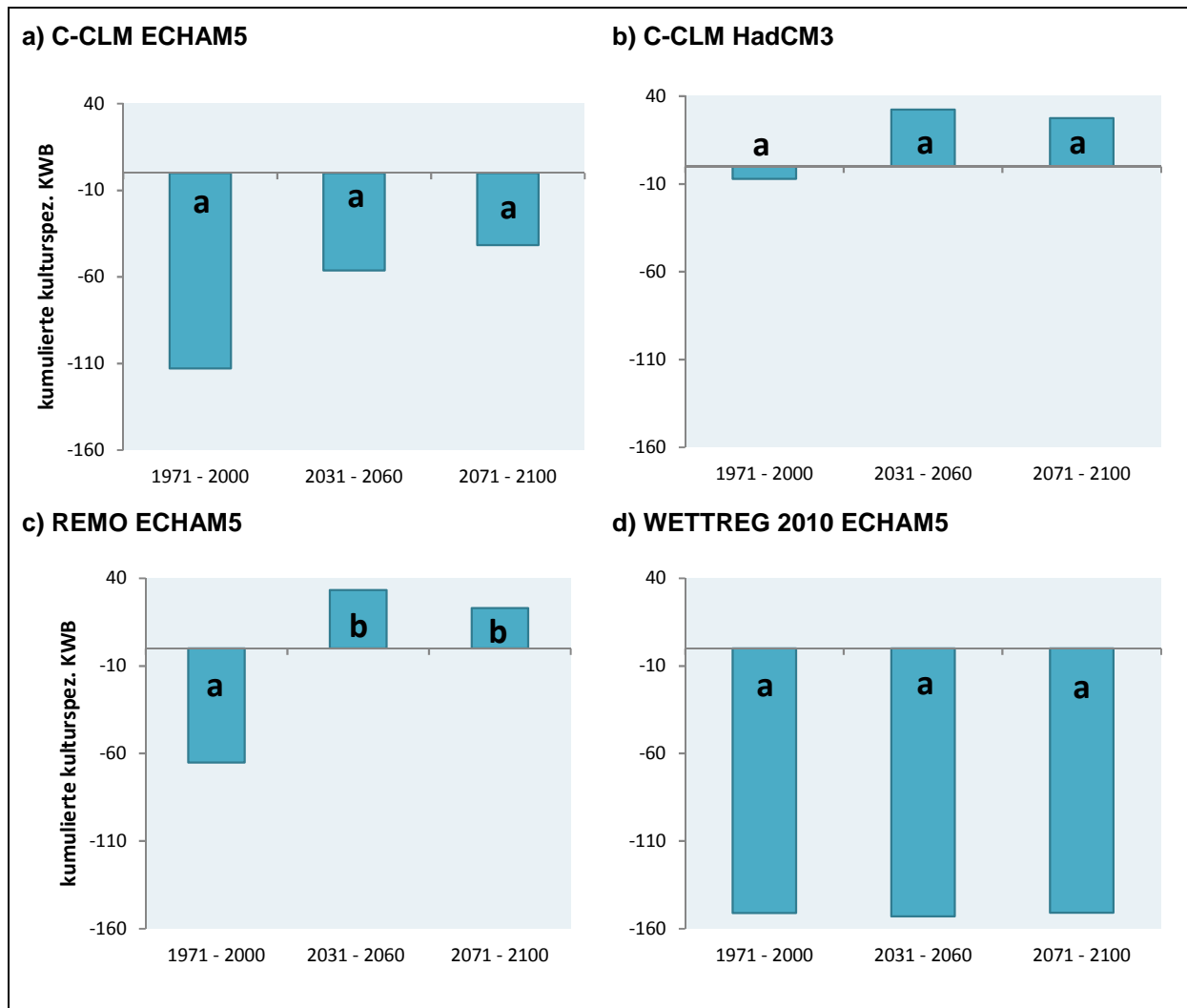


Abbildung 27: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Zwiebeln im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Der Bewässerungsbedarf für den Anbau von Zwiebeln unter der Annahme einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode, unterteilt nach Modellkombination und den 30jährigen Perioden, ist in Abbildung 28 visualisiert. Die erforderliche Bewässerungsmenge für die Zwiebel für variable Anbauzeiträume liegt im Modellmittel bei 217 mm in 1971 - 2000, bei 221 mm in 2031 - 2060 sowie bei 231 mm in 2071 - 2100. Jeweils bezogen auf den direkten Vergleich der 30jährigen Mittelwerte von 2071 - 2100 und 1971 - 2000, simulieren die Modelle einzeln betrachtet kein einheitliches Bild. Im Gegensatz zu den anderen Modellen, simuliert REMO keine Zunahme der Bewässerungsmenge. Bei den anderen Modellen nimmt die Bewässerungsmenge im Detail von 217 auf 233 mm bei C-CLM (ECHAM5), von 214 auf 234 mm bei C-CLM (HadCM3) und von 230 auf 249 mm bei WETTREG 2010 zu. Die simulierte Zunahme ist jedoch nur für das Modell WETTREG 2010 signifikant nachweisbar, wobei das WETTREG 2010 eine wesentlich kleinere Bandbreite im Vergleich zu den anderen Modellkombinationen simuliert. Das Minimum und Maximum umfassen dabei einen Wertebereich von minimal 84 mm bis maximal 343 mm in der Referenzperiode. Zukünftig (2071 - 2100) liegt dieser Wertebereich zwischen 63 und 411 mm. Statistisch gesehen tritt zukünftig im Mittel also keine signifikante Zunahme der Bewässerungsmenge auf.

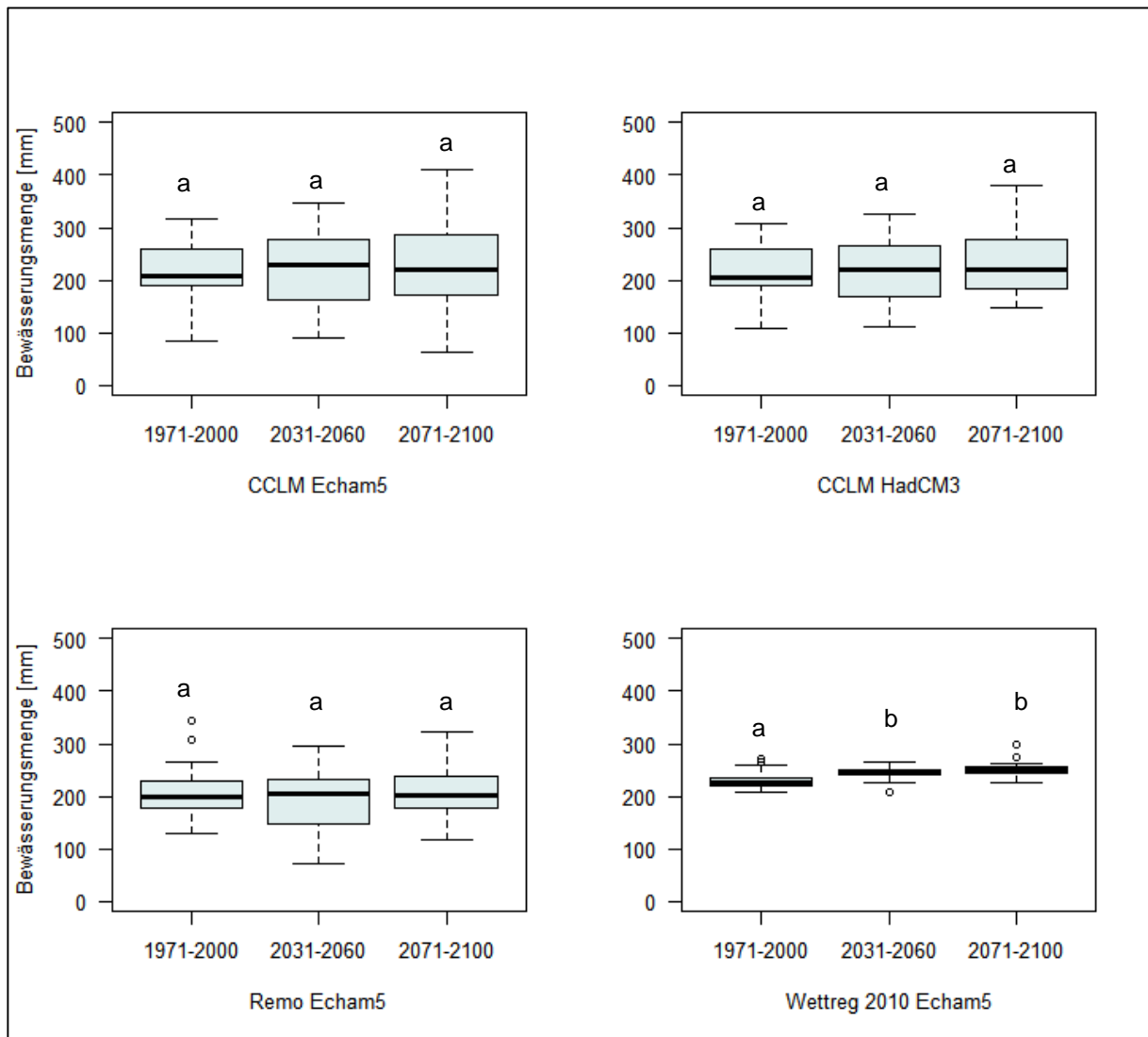


Abbildung 28: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Zwiebeln während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (A-NOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

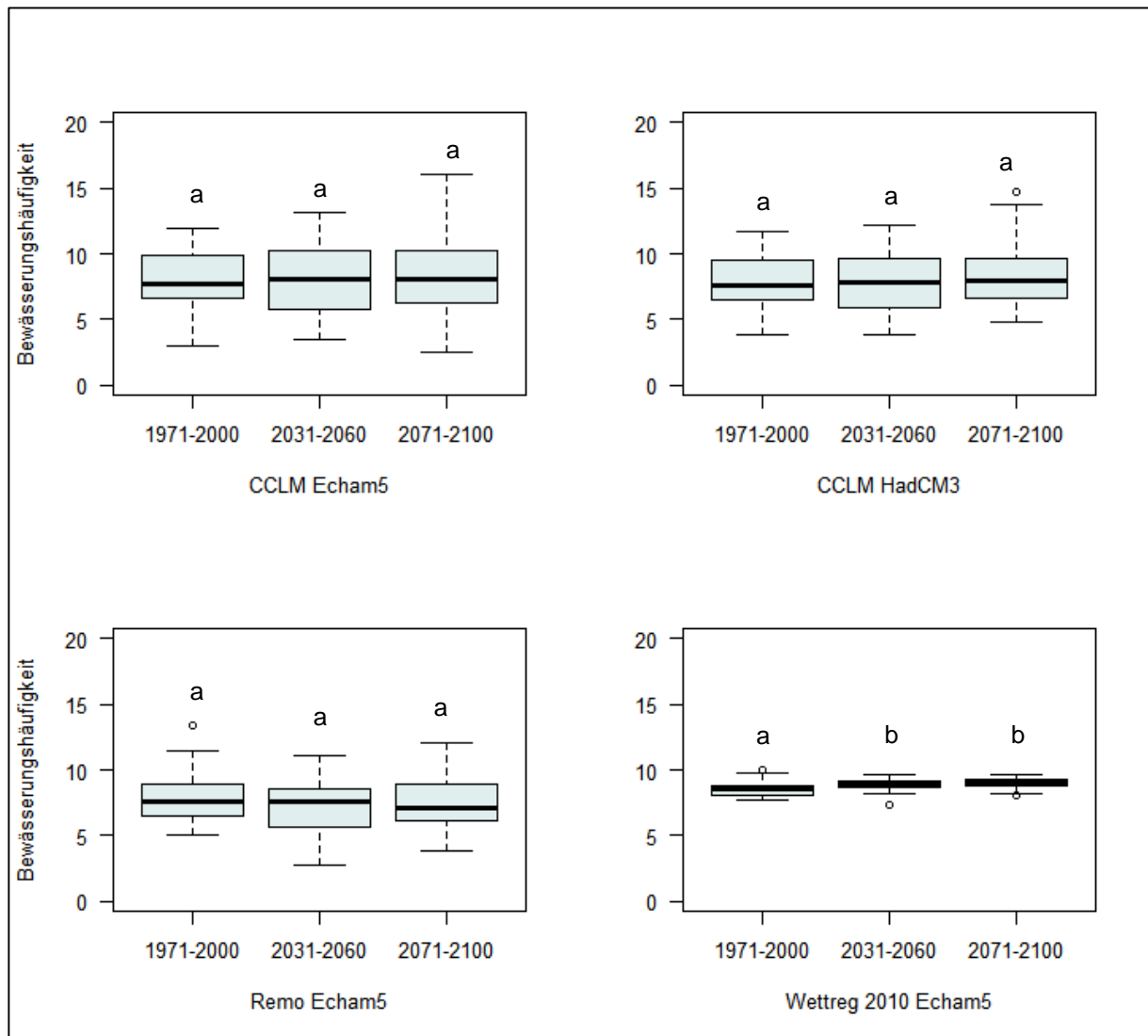


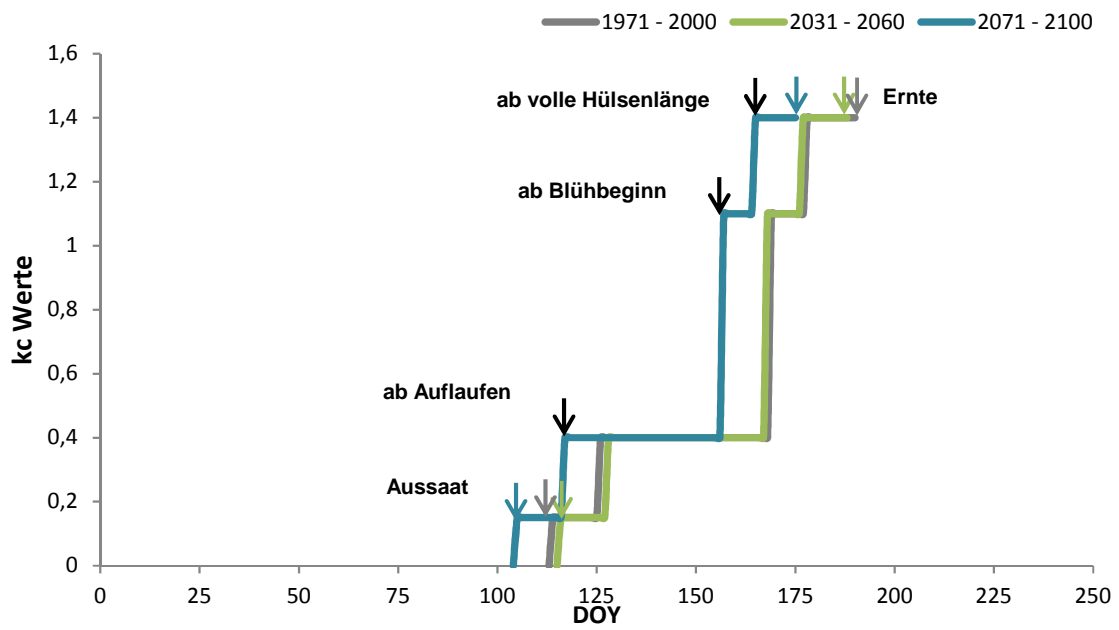
Abbildung 29: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Zwiebeln unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Im Modellmittel ergibt sich bezüglich der Bewässerungshäufigkeit einheitlich ein Wert von acht Einzelgaben für 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100. Bei Betrachtung der 30jährigen Mittelwerte im Einzelnen tritt für die Modellkombinationen C-CLM (ECHAM5) sowie C-CLM (HadCM3) keine Veränderung der Bewässerungshäufigkeit in 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 auf. Das Modell REMO simuliert eine Abnahme von acht auf sieben Einzelgaben und WETTREG 2010 eine Zunahme von acht auf neun Einzelgaben im Mittelwertvergleich (Abbildung 29). Analog zu den Ergebnissen bzgl. der Bewässerungsmenge ist auch für die Bewässerungshäufigkeit keine Signifikanz feststellbar. Ausgenommen hier wieder das Modell WETTREG 2010, bei dem sich beide Zukunftspereoden von der Referenzperiode, aber nicht voneinander signifikant unterscheiden. Die Spannweite zwischen Minimum und Maximum aller Modelle deckt einen Wertebereich von 3 bis 13 in 1971 - 2000 ab, welche sich in 2071 - 2100 minimal, auf zwei bis 16 Gaben, verschiebt.

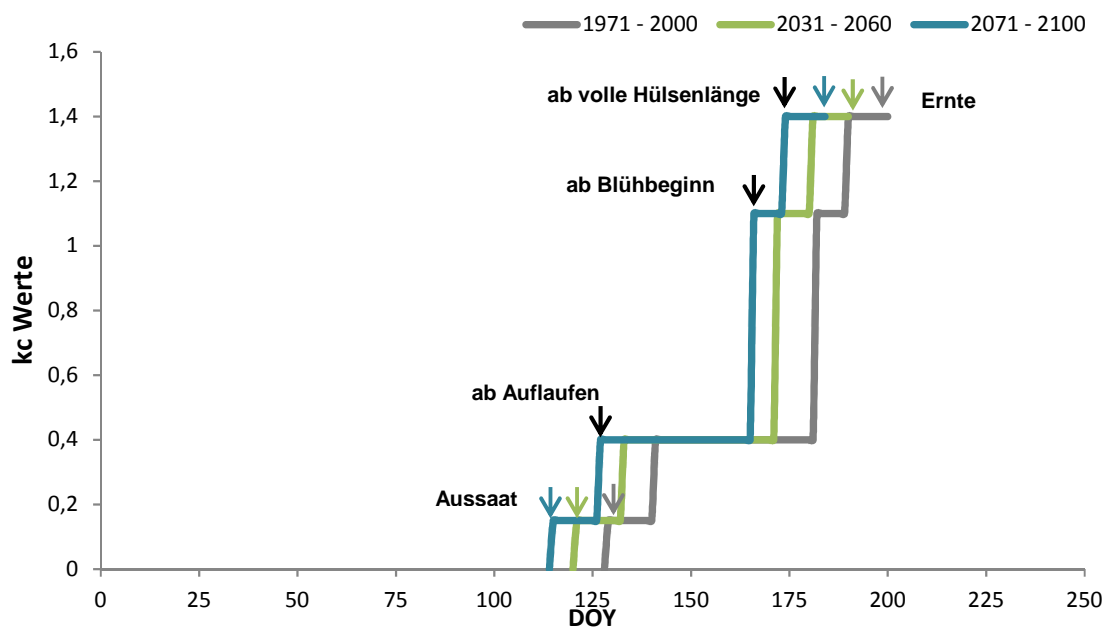
5.3.2.2. Buschbohne

Die simulierte, zukünftige Entwicklung der einzelnen k_c Umstelltermine für Buschbohne unter der Annahme, dass sich die thermische Vegetationsperiode und damit verbunden der potentielle Anbauzeitraum verschieben, sind in Abbildung 30 dargestellt. Für den direkten Vergleich von 2071 - 2100 mit 1971 - 2000 ergibt sich im Mittel über die Modelle eine Verfrühung des Aussaattermins um 12 Tage. Die Verfrühung des Aussaattermins setzt sich in einer Verfrühung der einzelnen Eintrittstermine der Stadien fort. Für k_c 1 (ab Auflaufen) beträgt die Verfrühung 13 Tage, für k_c 2 (ab Blühbeginn) und k_c 3 (ab volle Hülsenlänge) jeweils 15 Tage. Die Ernte verfrüht sich im Modellmittel um 16 Tage. Bezüglich der Gesamtkulturdauer ergibt sich daraus durchschnittlich eine Verkürzung um vier Tage.

a) C-CLM ECHAM5



b) C-CLM HadCM3



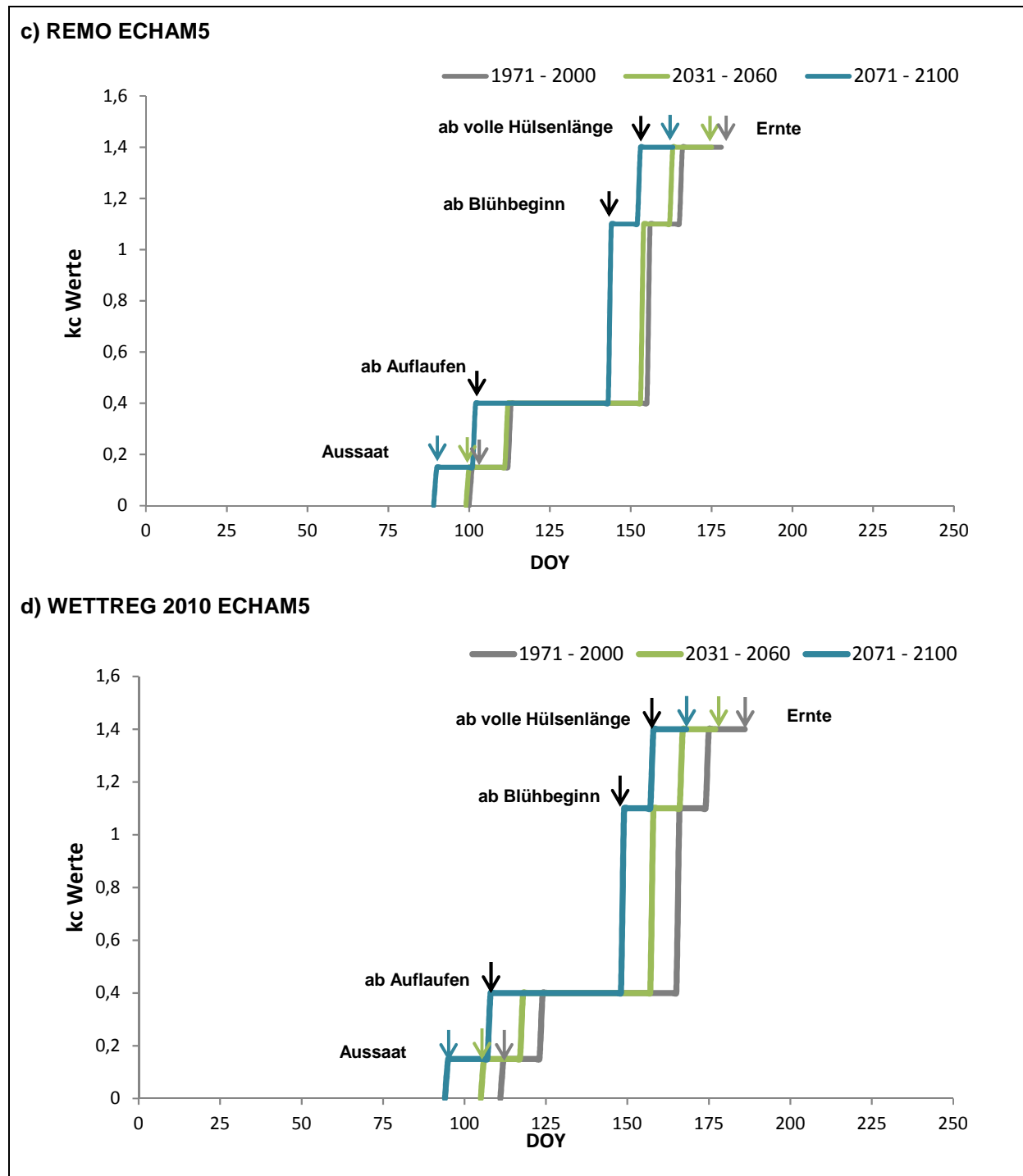


Abbildung 30: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen der Buschbohne für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c -Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.

In Abbildung 31 ist die berechnete kulturspezifische Wasserbilanz für Buschbohne bei an die Temperaturveränderungen angepasstem Anbau dargestellt. Dabei lässt sich interessanterweise für die Buschbohne keine positive Entwicklung der KWB feststellen, obwohl der Anbauzeitraum im Jahr zeit-

lich vorverlegt wurde. Hier spielt im Wesentlichen die Frostempfindlichkeit der Buschbohne eine Rolle. Die Verfrühung fällt vergleichsweise gering aus, sodass der Anbau immer noch in den Zeitraum des Jahres fällt, indem bereits hohe Temperaturen, aber vergleichsweise geringe Niederschläge vorkommen. Die Modelle C-CLM (HadCM3) sowie REMO (ECHAM5) simulieren im Referenzzeitraum 1971 - 2000 eine positive KWB, die sich zunehmend negativ entwickelt. In 2071 - 2100 verbleibt diese im Fall REMO noch im positiven Wertebereich, für C-CLM (HadCM3) fällt das Minimum sehr gering aus und verbleibt nah an der Nulllinie. Die beiden anderen Modellkombinationen simulieren bereits in 1971 - 2000 eine negative KWB von -11 mm (C-CLM (ECHAM5)) bzw. -37 mm (WETTREG 2010). Für alle Modellkombinationen wird zukünftig ein zunehmendes Defizit simuliert. Die statistische Auswertung ergibt, dass nur das Modell WETTREG 2010 eine signifikante Veränderung der KWB für 2031 - 2060 sowie 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenz simuliert. Die anderen Modelle weisen zwar eine gewisse Tendenz auf, dass die KWB mit zunehmender Zeit ein erhöhtes Defizit aufweist, allerdings ist diese statistisch nicht signifikant.

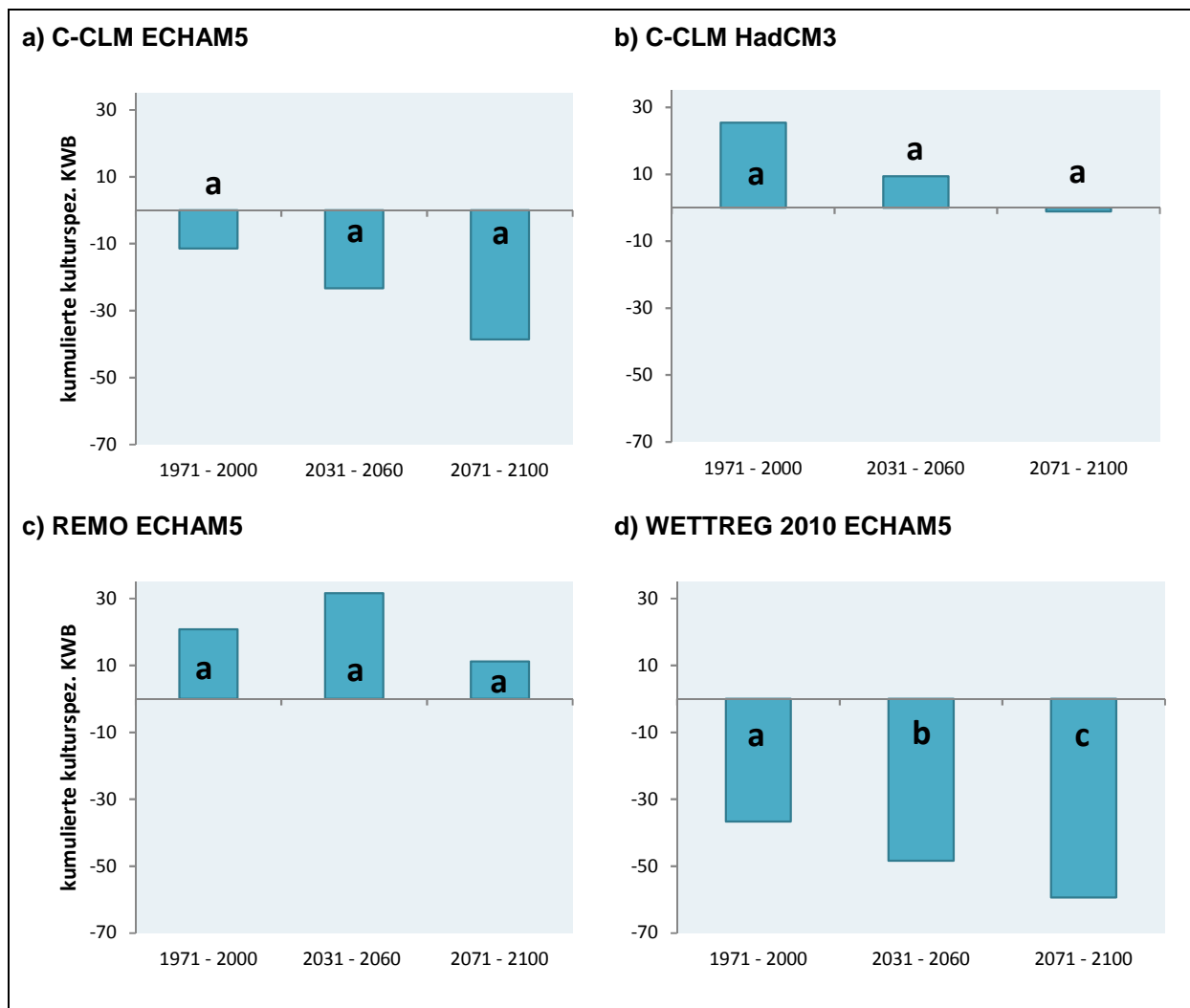


Abbildung 31: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Buschbohne im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraumes. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Auch die nur geringfügige Verfrühung des Anbauzeitraumes macht sich bereits in den Ergebnissen zur Bewässerungsmenge bemerkbar (Abbildung 32). Im Modellmittel beträgt die erforderliche Bewässerungsmenge für Buschbohne 63 mm in 1971 - 2000, 68 mm in 2031 - 2060 sowie 75 mm in 2071 -

2100. Im Vergleich der 30jährigen Mittelwerte von 2071 - 2100 und 1971 - 2000 für die Bewässerungsmenge simuliert C-CLM (ECHAM5) eine Zunahme von 63 auf 90 mm, das Modell REMO (ECHAM5) von 59 auf 68 mm und WETTREG 2010 von 72 auf 88 mm. Das Modell C-CLM (HadCM3) hingegen simuliert keine Veränderung, da die Abnahme von 58 auf 55 mm äußerst gering ausfällt. Die Signifikanz lässt sich nur für die Modelle C-CLM (ECHAM5) und WETTREG 2010 nachweisen. Minimum und Maximum erstrecken sich dabei auf einen Wertebereich von minimal zwei mm bis maximal 141 mm in der Referenzperiode. Zukünftig (2071 - 2100) liegt dieser Wertebereich zwischen null und 171 mm.

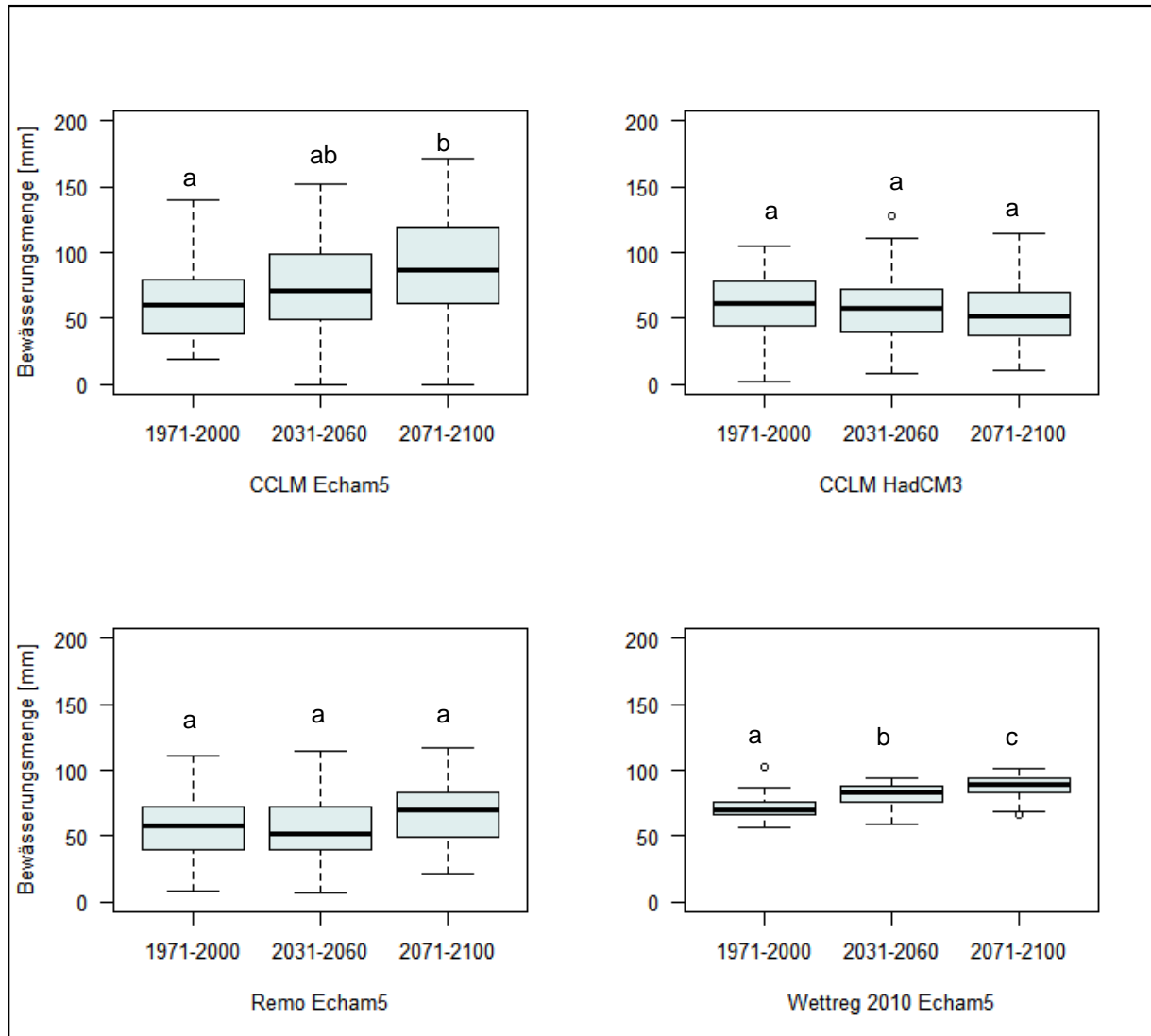


Abbildung 32: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Buschbohne während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, $\alpha = 5\%$)

Für die Bewässerungshäufigkeit (Abbildung 33) ergibt sich statistisch das gleiche Signifikanzbild. Die simulierten Veränderungen sind nur bei C-CLM (ECHAM5) und WETTREG 2010 statistisch nachweisbar. Im Modellmittel liegt die Anzahl der Bewässerungsgaben bei jeweils zwei in 1971 - 2000 und 2031 - 2060 und steigt dann auf drei Zusatzwassergaben in 2071 - 2100 an. Sowohl hinsichtlich der Zusatzwassermengen als auch der Anzahl der Zusatzwassergaben sind in der nahen bzw. fernen Zukunft nur geringe Zunahmen, im Vergleich zur Referenzperiode, zu verzeichnen.

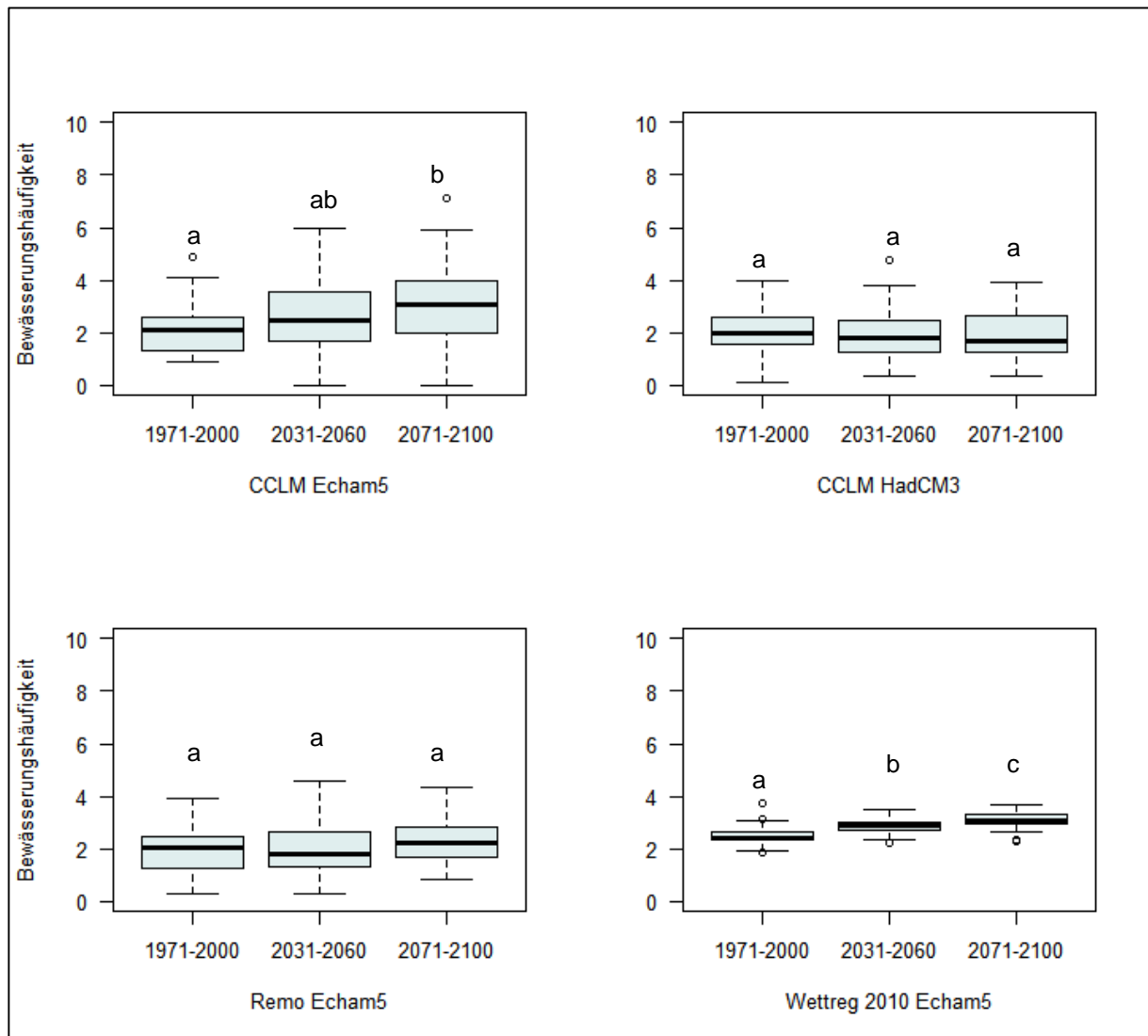


Abbildung 33: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Buschbohne unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

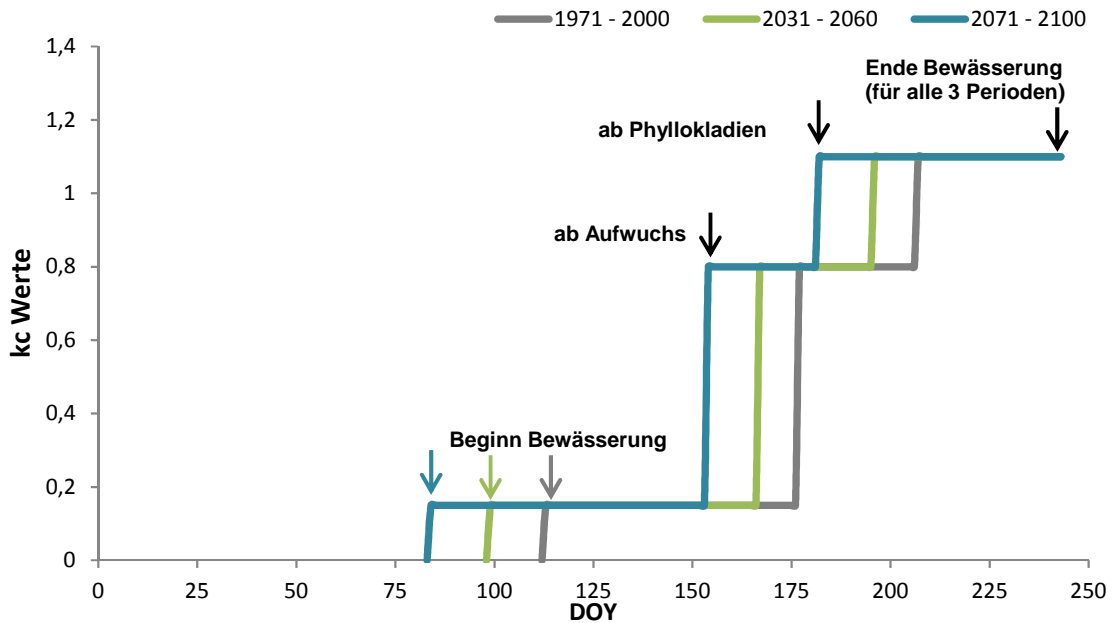
5.3.2.3. Spargel

Für den Anbau von Spargel unter der Annahme einer sich verändernden thermischen Vegetationsperiode ergeben sich für den Beginn der Bewässerung (Beginn der Ernte) variable Termine basierend auf Temperatursummen, da für den Eintrittstermin des Stadiums ein Bezug zum physiologischem Wachstum und damit zur Temperatur hergestellt werden konnte. Dies war für den Termin für das Ende der Bewässerungszeit auf Grundlage der Versuchsdaten aus Geisenheim jedoch nicht möglich, sodass mit dem ersten September ein empirisch festgelegter Termin verwendet wird.

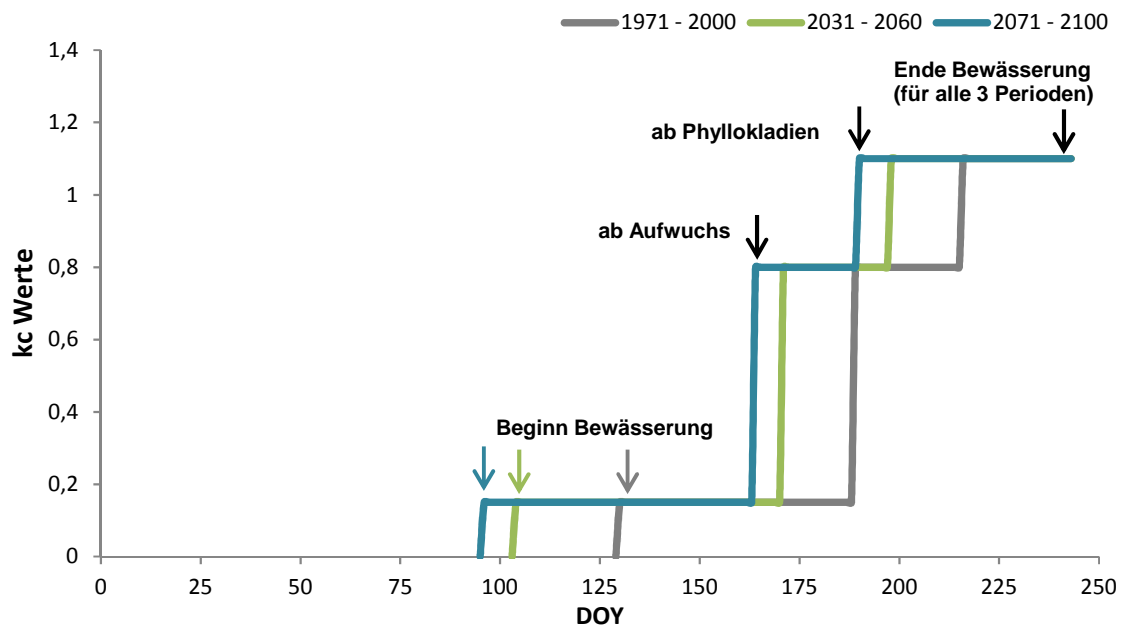
Ausgehend von dem durch die Modelle simulierten zukünftigen Temperaturanstieg, verfrühen sich die Eintrittstermine der einzelnen Stadien im Jahresverlauf zunehmend bis 2071 - 2100. Der Beginn der Ernte verfrüht sich im Modellmittel um 32 Tage. Das Eintrittsdatum für das Stadium k_c 1 (ab Aufwuchs) verschiebt sich um 25 Tage und für Stadium k_c 2 (ab Phyllokladien) um 26 Tage früher ins Jahr (Abbildung 34). Der Erntezeitraum verlängert sich zukünftig zunehmend, bezogen auf den Beginn,

während sich das k_c 1 Stadium verkürzt. Die Verlängerung des k_c 2 Stadiums ist insofern nicht relevant bzw. interpretierbar, da dies durch den fixierten Endtermin in Assoziation mit dem verfrühten Eintrittstermin des Stadiums zustande kommt.

a) C-CLM ECHAM5



b) C-CLM HadCM3



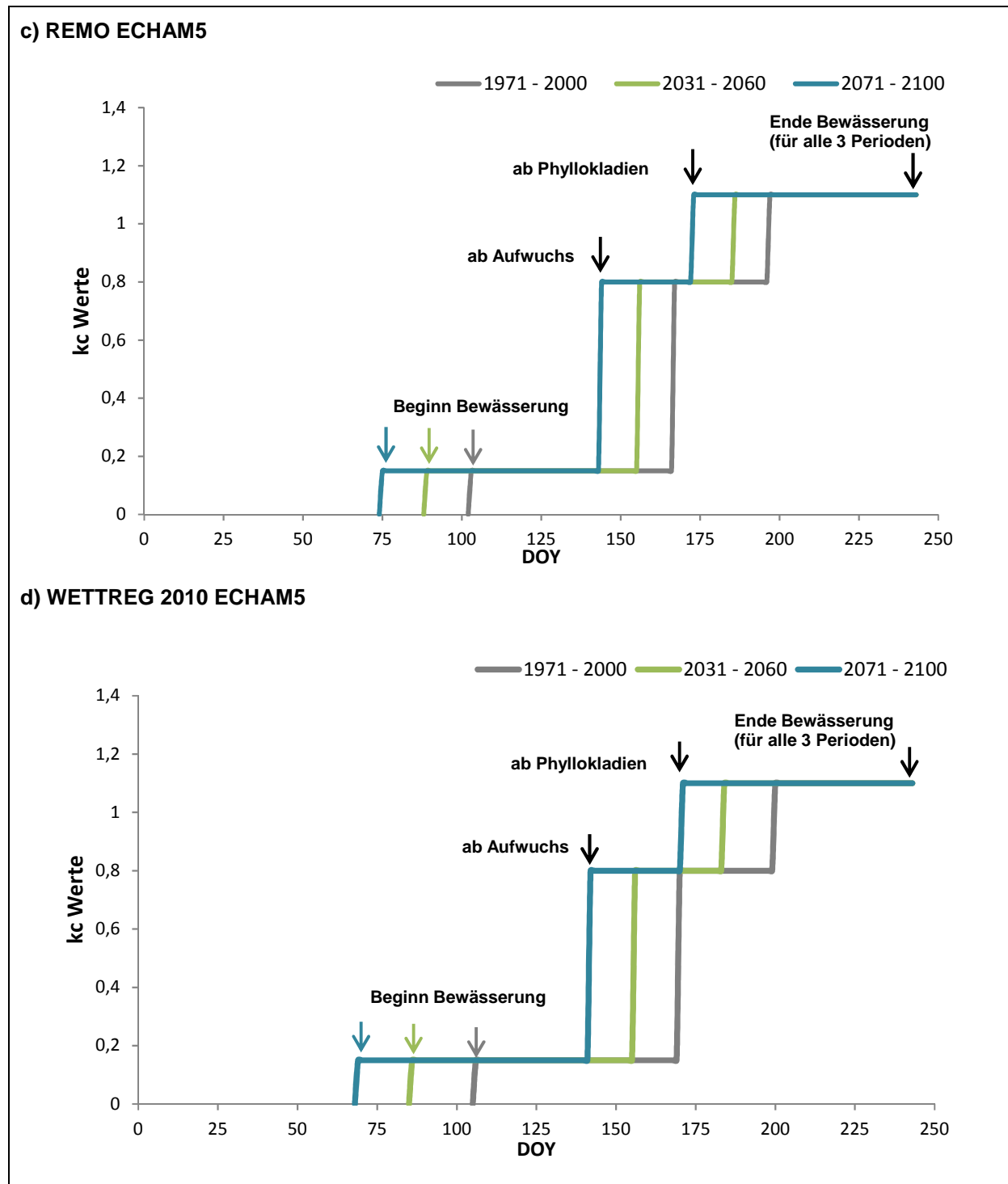


Abbildung 34: Simulierte phänologische Entwicklungsstufen des Spargels für das Hessische Ried (Flächenmittel) unter Berücksichtigung einer Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode. Dargestellt sind die Umstelltermine für die k_c -Faktoren bezogen auf den jeweiligen Tag des Jahres [DOY] basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Zeiträume 2031 - 2060 und 2071 - 2100 mit der Referenzperiode 1971 - 2000.

Die kulturspezifische klimatische Wasserbilanz für Spargel ist in Abbildung 35 visualisiert. Bis auf WETTREG 2010, simulieren die Modelle eine positive KWB im Referenzzeitraum 1971 - 2000. Äquivalent zur Buschbohne und im Gegensatz zur Zwiebel, zeigt sich auch beim Spargel für alle Modellkombination kongruent eine zukünftig zunehmend negative Entwicklung der KWB. Für 2031 - 2060

wird nur durch das Modell REMO (ECHAM5) eine KWB simuliert, die noch im positiven Wertebereich liegt. Im Mittelwertvergleich zwischen 2071 - 2100 und 1971 - 2000 ist die simulierte Abnahme in allen Modellen signifikant. Ausschließlich C-CLM (HadCM3) sowie WETTREG 2010 simulieren bereits eine signifikante Verminderung der KWB in 2031 - 2060. Bei Betrachtung aller Modellvarianten insgesamt ergibt sich eine Bandbreite für die kulturspezifische KWB für Spargel von bis zu +75 mm im Referenzzeitraum hin zu einem zukünftigen Defizit von bis zu -176 mm.

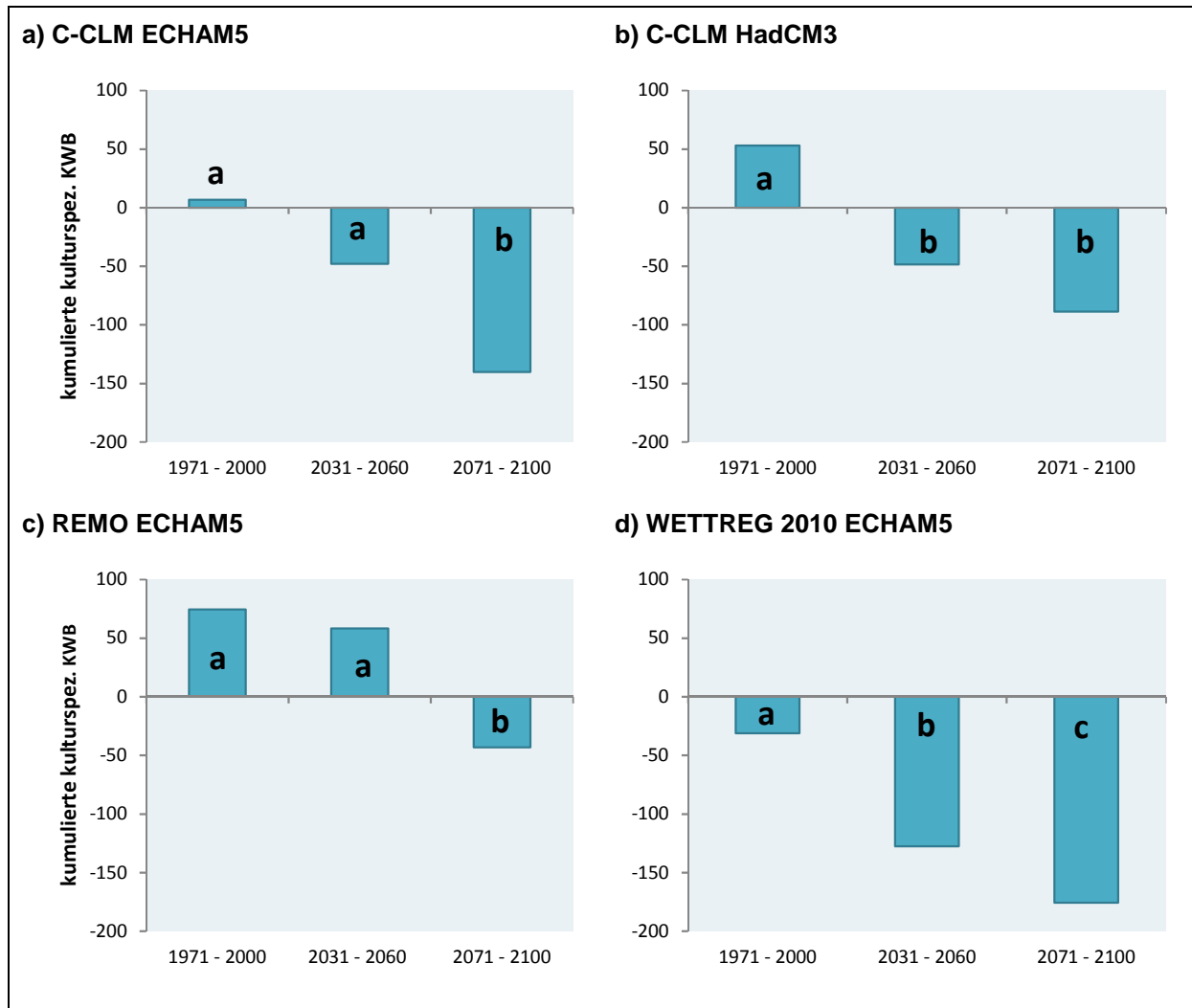


Abbildung 35: Kumulierte kulturspezifische klimatische Wasserbilanz [mm] für Spargel im Hessischen Ried (Flächenmittel) im 30jährigen Mittel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

Die aus dem veränderten Anbauzeitraum resultierende Bewässerungsmenge für Spargel nimmt zukünftig allgemein zu (Abbildung 36). Bezugnehmend auf das Modellmittel steigt die Bewässerungsmenge von 100 mm in 1971 - 2000 auf 175 mm in 2031 - 2060 und dann nochmals auf 254 mm in 2071 - 2100 an. Die Zunahme ist für alle Modelle signifikant. Im Einzelnen steigt diese bei C-CLM (ECHAM5) von 97 auf 260 mm, bei C-CLM (HadCM3) von 86 auf 222 mm, bei REMO (ECHAM5) von 102 auf 220 mm und bei WETTREG 2010 (ECHAM5) von 114 auf 314 mm im direkten Vergleich der 30jährigen Mittelwerte von 2071 - 2100 zur Referenz. Insgesamt betrachtet liegt in der Referenzperiode das Minimum bei minimal null mm und das Maximum maximal bei 232 mm. Im Vergleich der verschiedenen Modellvarianten verschiebt sich dieser Bereich bis 2100 auf minimal neun mm und maximal 492 mm.

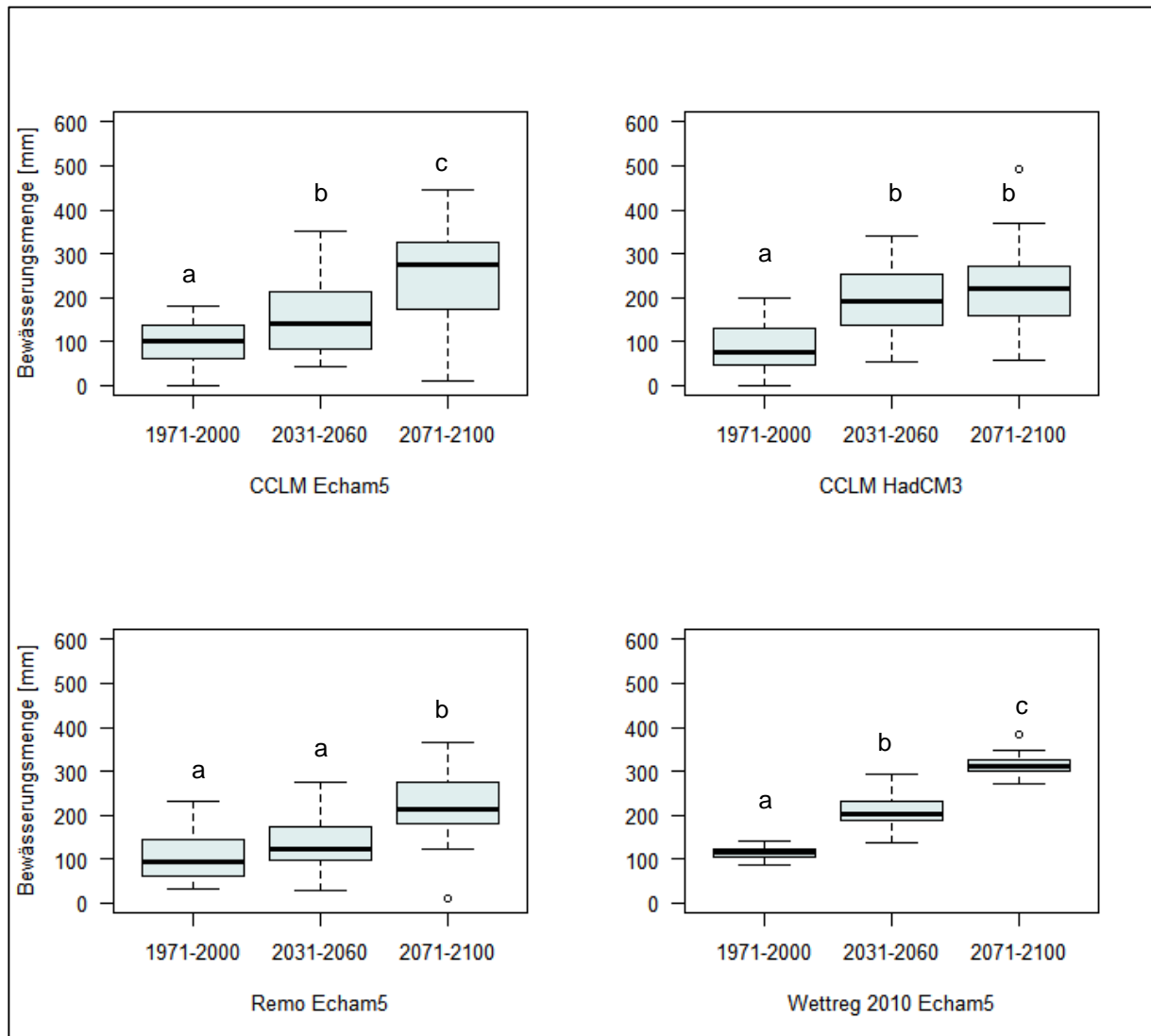


Abbildung 36: Kalkulierte Gesamtbewässerungsmenge für Spargel während der Kultur unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, $\alpha = 5\%$)

Die Anzahl der Einzelgaben für die Bewässerung von Spargel (Abbildung 37) liegt im Modellmittel bei drei Gaben in 1971 - 2000, bei vier Gaben in 2031 - 2060 sowie bei sechs Gaben in 2071 - 2100. Für die Bewässerungshäufigkeit im Vergleich der 30jährigen Mittelwerte von 2071 - 2100 mit der Referenzperiode liegt das Minimum bei minimal null mm und das Maximum maximal bei 232 mm.

renzperiode simuliert C-CLM (ECHAM5) einen Anstieg der Einzelgabenanzahl von drei auf sieben, C-CLM (HadCM3) von zwei auf sechs, REMO (ECHAM5) von drei auf fünf und WETTREG 2010 von drei auf acht. Dieser zukünftige Anstieg der Einzelgabenanzahl ist in allen Modellkombinationen signifikant. Für 1971 - 2000 deckt die Spannweite (minimal und maximal) aller Modelle einen Wertebereich von keiner bis sechs Einzelgaben und in 2071 - 2100 von keiner bis 13 Einzelgaben ab. Das bedeutet also, dass zukünftig bis zu doppelt so viele Einzelgaben nötig sein können, um die erforderliche Bewässerungsmenge auszubringen.

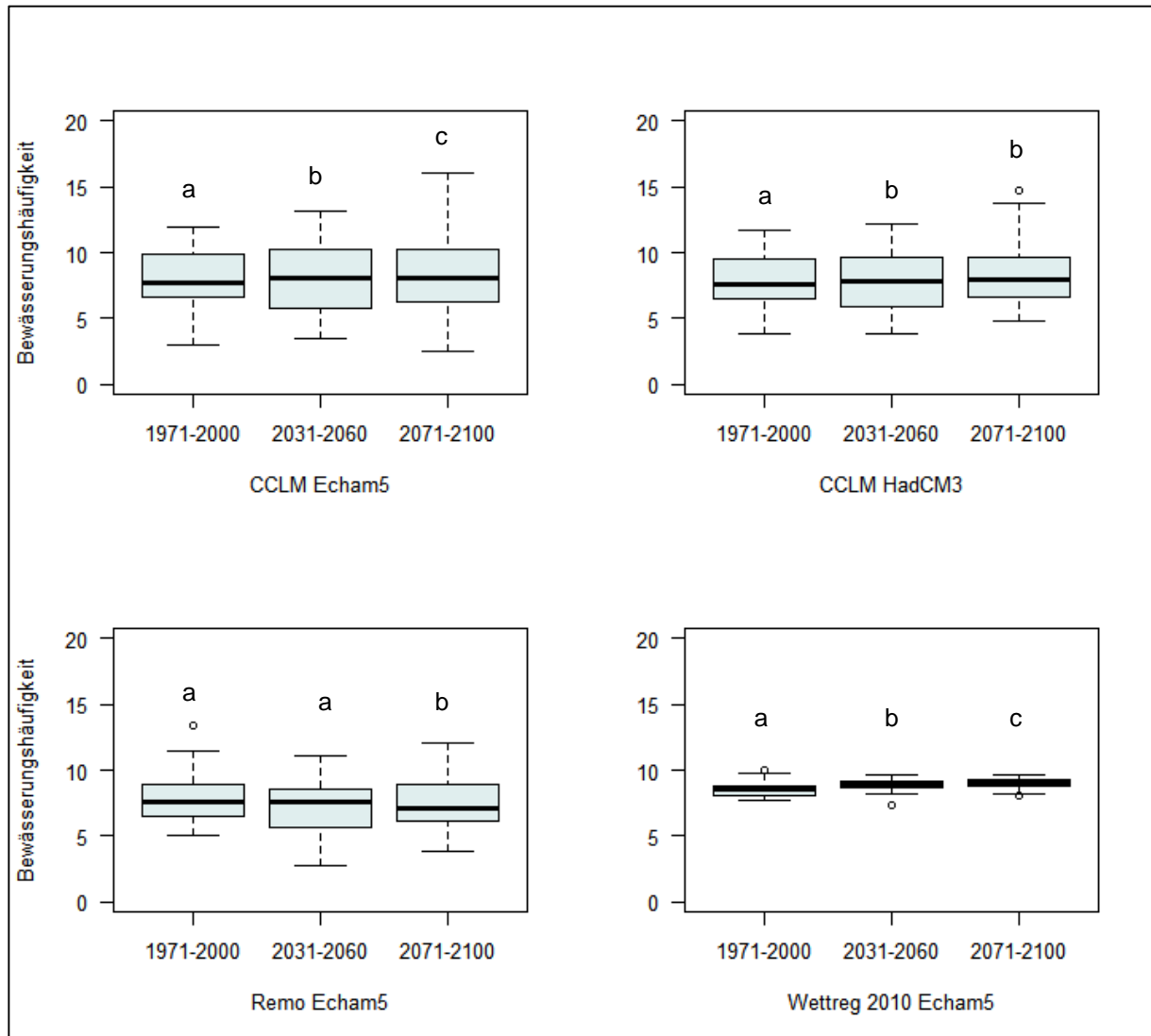


Abbildung 37: Kalkulierte Anzahl der Bewässerungseinzelgaben für Spargel unter Berücksichtigung einer Verschiebung des Anbauzeitraums. Signifikante Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA bzw. Kruskal-Wallis, Tukey, alpha = 5%)

5.3.3. Fazit

Die Ergebnisse im Mittel über alle Modelle bezüglich der zukünftigen Entwicklung der kulturspezifischen KWB, der Zusatzwassermengen sowie der Anzahl der Zusatzwassergaben für die drei Kulturen jeweils mit und ohne Verschiebung der Anbauzeiten sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Unter der Annahme eines klassischen Anbauzeitraumes nimmt das Defizit der kulturspezifischen KWB bei allen drei Kulturen bis 2100 zu. Bezüglich der erforderlichen Zusatzwassermenge ergibt sich von 1971 - 2000 zu 2071 - 2100 im Modellmittel ein Anstieg bei Zwiebeln von 216 auf 252 mm, bei Buschbohne von 63 auf 85 mm und bei Spargel von 109 auf 223 mm. Die Bewässerungshäufigkeit steigt nur geringfügig an: bei Zwiebeln von acht auf neun, bei Buschbohne von 2 auf 3 und bei Spargel von 3 auf 5 Einzelgaben.

Unter Annahme eines zeitlich angepassten Anbaus zeigt sich im Modellmittel für die kulturspezifische KWB ein zukünftig zunehmendes Defizit bei Buschbohne und Spargel. Bei der Kultur Zwiebel kann eine Abnahme des Defizits beobachtet werden. Die Veränderung der erforderlichen Bewässerungsmenge von 1971 - 2000 zu 2071 - 2100 ergab einen Anstieg bei Zwiebeln von 217 auf 231 mm, bei Buschbohne von 63 auf 75 mm sowie bei Spargel von 100 auf 254 mm.

Die Bewässerungshäufigkeit zeigt keine Veränderung bei der Kultur Zwiebel. Bei Buschbohne bzw. Spargel ist ein leichter Anstieg von zwei auf drei bzw. von drei auf sechs Einzelgaben zu verzeichnen.

Obwohl das Defizit der kulturspezifischen KWB bei Zwiebeln im Fall des zeitlich angepassten Anbaus zukünftig abnimmt, tritt ein Anstieg der Bewässerungsmenge auf. Dies hängt damit zusammen, dass sich der Anbauzeitraum früher ins Jahr verschiebt und mehr Niederschlag für die Kultur zur Verfügung steht, sprich das Defizit der kulturspezifischen KWB nimmt ab. Allerdings bedingt der verfrühte Anbauzeitraum, dass sich die Kulturdauer insgesamt verlängert, da die erforderlichen Temperaturen für das Wachstum erst später erreicht werden. Eine längere Kulturdauer wiederum führt zu einem längeren Bewässerungszeitraum und somit einer erhöhten Zusatzwassermenge, da zwar nicht die Anzahl, aber die Höhe der Einzelgaben ansteigt.

Ein weiterer, interessanter Aspekt ist der **Vergleich** der Auswirkungen des Klimawandels auf den Bewässerungsbedarf der Kulturen **zwischen den beiden Anbauvarianten**. Bezüglich der Bewässerungsmenge weisen die Ergebnisse daraufhin, dass durchaus eine **Wassersparnis mit einem zeitlich angepassten Anbau** erzielt werden kann. Im 30jährigen Mittel über alle Modelle für 2071 - 2100 beträgt die benötigte Zusatzwassermenge bei **Zwiebeln** 252 mm im klassischen Anbauzeitraum, bei einem zeitlich angepassten Anbauzeitraum nur noch 231 mm – **die Reduzierung beträgt demnach 21 mm**. Bei der **Buschbohne** kann diese Reduzierung ebenfalls beobachtet werden: Die Bewässerungsmenge im klassischen Anbau beträgt in 2071 - 2100 85 mm, im zeitlich angepassten Anbau 75 mm: Somit kann trotz einer negativen kulturspezifischen KWB ebenfalls eine **Reduzierung der erforderlichen Bewässerungsmenge um 10 mm** durch die angepasste Anbauvariante erzielt werden kann. Einzige Ausnahme ist, wie bereits mehrfach erwähnt, die Kultur Spargel. Hier tritt keine Reduzierung, sondern eine Erhöhung der benötigten Bewässerungsmenge im Vergleich zwischen den Anbauvarianten auf, was jedoch auf die methodisch bedingte Verlängerung der Kulturdauer bzw. auf den festen Endtermin zurückzuführen ist.

Tabelle 12: Vergleich der Kulturdauer, der kulturspezifischen KWB, der Menge des Zusatzwasserbedarfs sowie der Anzahl der Zusatzwassergaben für die Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel für die Zeiträume 1971 - 2000, 2031 - 2060 und 2071 - 2100 im Mittel über alle Modellkombinationen zwischen Anbau ohne und mit zeitlicher Anpassung

Kultur	Zeitraum	Anbau ohne zeitliche Anpassung										Anbau mit zeitlicher Anpassung											
		Kulturdauer	spez. KWB				Zusatzwasserbedarf						Kulturdauer	spez. KWB				Zusatzwasserbedarf					
			Menge			Anzahl	MW	Min*	Max*	MW	Min*	Max*		MW	Min*	Max*	MW	Min*	Max*	MW	Min*	Max*	
			MW	Min*	Max*																		
Zwiebel	1971 - 2000	138	-106	-246	15	216	74	317	8	2	13	147	-87	-211	28	217	84	343	8	3	13		
	2031 - 2060	130	-122	-231	-31	232	58	369	8	2	14	160	-36	-171	76	221	72	346	8	3	13		
	2071 - 2100	122	-156	-254	-52	252	140	416	9	4	16	161	-35	-187	101	231	63	411	8	2	16		
Buschbohne	1971 - 2000	71	-4	-77	68	63	7	130	2	0	5	78	-6	-64	54	63	2	141	2	0	5		
	2031 - 2060	66	-27	-87	42	73	0	141	2	0	6	75	-13	-112	74	68	0	153	2	0	6		
	2071 - 2100	61	-56	-111	-11	85	8	172	3	0	7	74	-29	-107	28	75	0	171	3	0	7		
Spargel	1971 - 2000	140**	26	-106	120	109	0	226	3	0	6	133***	22	-121	113	100	0	232	3	0	6		
	2031 - 2060	140**	-40	-180	66	164	16	333	4	1	9	152***	-43	-177	56	175	27	351	4	1	8		
	2071 - 2100	140**	-119	-257	-24	223	10	452	5	0	12	166***	-127	-291	-19	254	9	492	6	0	13		

* Die Angaben stellen nicht das Mittel über alle Modellkombinationen dar, sondern das Minimum bzw. Maximum aus den vier Modellkombinationen

** unveränderte Kulturdauer bedingt durch festen Start- und Endtermin

*** Verlängerung der Kulturdauer bedingt durch verfrühten Starttermin, aber gleichbleibendem Endtermin

5.4. Entwicklung, Wasser- und Stickstoffhaushalt von Zwiebeln (Lysimeter)

5.4.1. Pflanzenentwicklung

Ein relevanter Einfluss der Niederschlagsszenarien auf die Pflanzenentwicklung während der Entwicklungsdauer konnte nicht nachgewiesen werden, weil Sommertrockenheit infolge reduzierter Niederschläge durch eine bedarfsgerechte Bewässerung ausgeglichen wurde. In allen drei Versuchsjahren konnten an allen Boniturterminen keine Unterschiede zwischen den Varianten hinsichtlich der Merkmale Blattzahl, Blattfarbe und Entwicklungsstadium festgestellt werden. Die Pflanzenlänge der Varianten unterschieden sich geringfügig in allen drei Versuchsjahren lediglich an je einem der Boniturtermine pro Jahr. Variantenunterschiede im Zwiebeldurchmesser wurden nur 2012 an einem der Boniturtermine nachgewiesen. Auf eine Darstellung dieser fünf Merkmale wird deshalb verzichtet.

Die Variante 4 "Sommer -40%" zeigte 2011 und 2012 geringfügig niedrigere Bedeckungsgrade als die anderen Varianten. Statistisch unterscheidbar waren die Bedeckungsgrade im Jahr 2011 an sieben Terminen. Es zeigten sich bei der Variante 4 "Sommer -40%" ab Ende Mai bis Mitte Juni niedrigere Bedeckungsgrade als bei Variante 1. Ab Anfang/Mitte August deuteten geringere Bedeckungsgrade auf eine frühere Vergilbung des Laubs bei Variante 4 hin. Auch im Jahr 2012 zeigte die Variante 4 "Sommer -40%" Anfang August an einem Termin reduzierte Bedeckungsgrade. Im Jahr 2013 unterschieden sich die Bedeckungsgrade der Varianten nicht (Abbildung 38). Die zeitliche Dynamik des Bedeckungsgrads der Jahre 2011 und 2012 war nahezu identisch. Die verzögerte Pflanzenentwicklung im Jahre 2013 infolge niedriger Frühjahrstemperaturen spiegelt der später einsetzende Bedeckungsgrad wider.

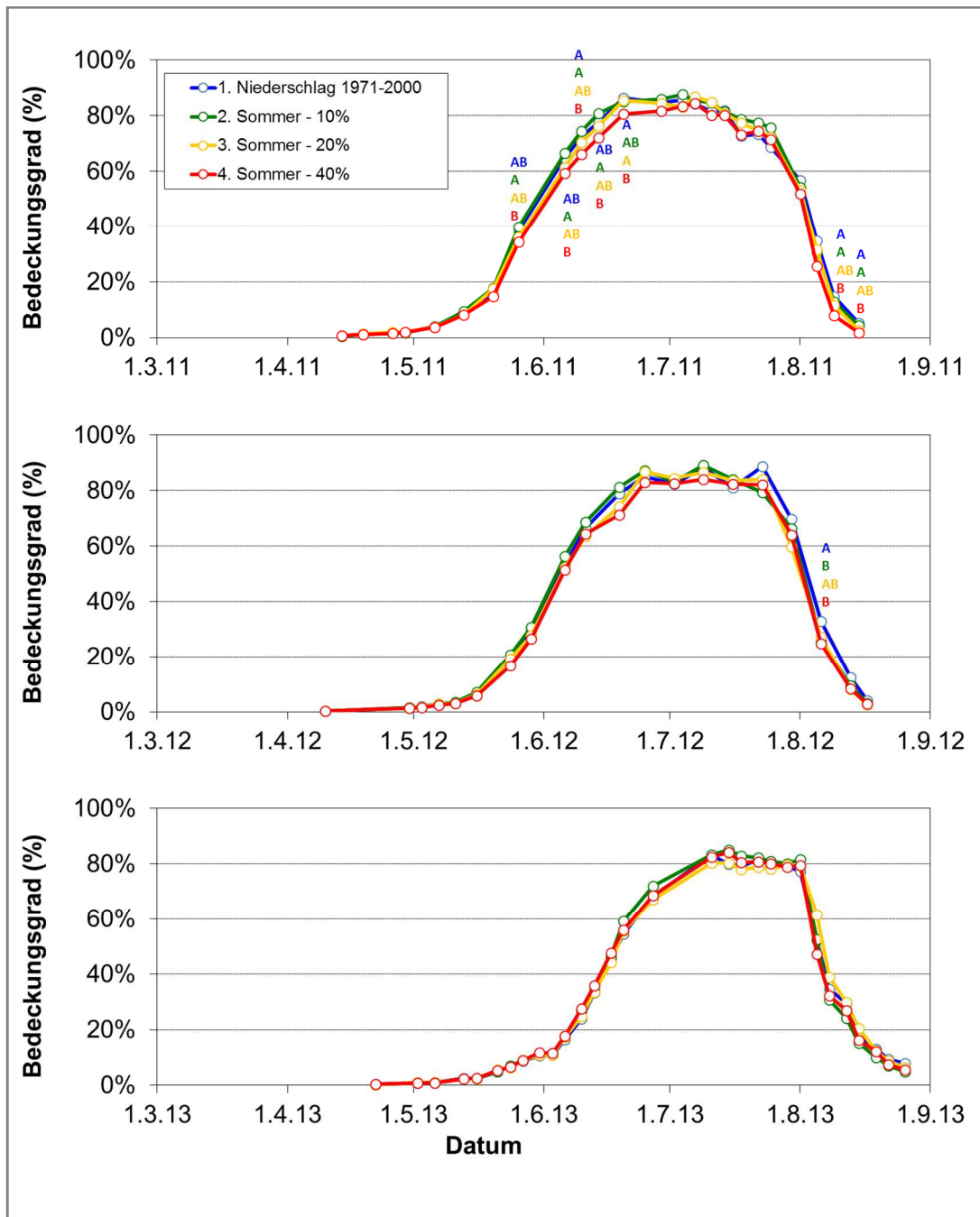


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf des Bedeckungsgrads (%) bei Zwiebeln in 420 L Gefäßen mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013. A, B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$.

In allen drei Versuchsjahren zeigte die Variante 2 "Sommer -10%" den höchsten Ertrag mit 10,6 bis 11,7 kg/m² (Abbildung 39). Eine signifikante Ertragsabnahme war 2011 bei der Variante 4 "Sommer -40%" und im Jahr 2012 bei der Variante 3 "Sommer -20%" feststellbar. Im Jahr 2013 konnte kein Einfluss des Niederschlagszenarios auf den Ertrag nachgewiesen werden.

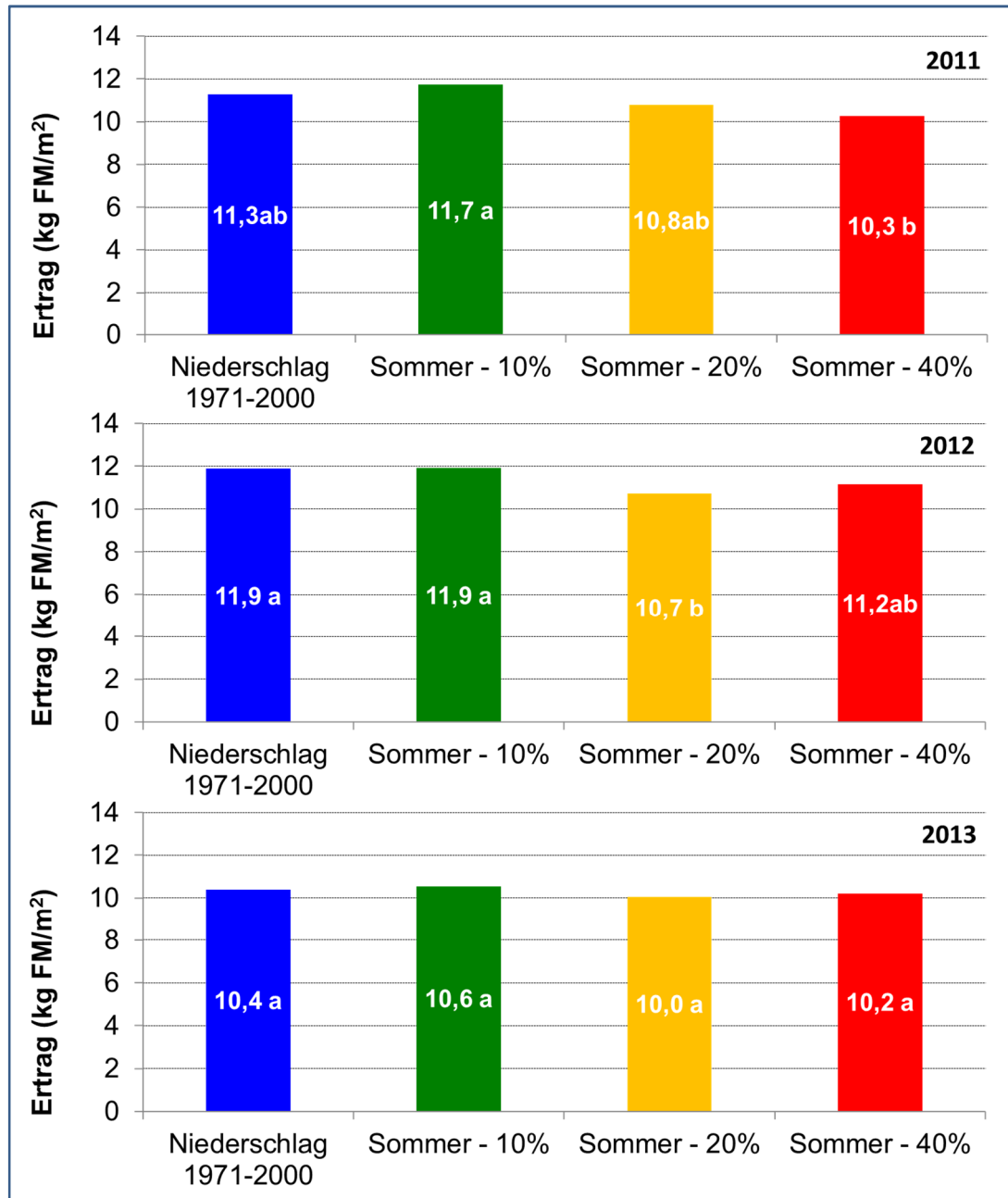


Abbildung 39: Frischmasse (kg/m²) von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013 (a,b,c: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey; $\alpha=0,05$).

Das im Jahr 2013 im Vergleich zu den beiden ersten Versuchsjahren abnehmende Ertragsniveau wird als Folge der verzögerten Pflanzenentwicklung im dritten Versuchsjahr betrachtet. Ausgeschlossen werden kann nicht, dass im dritten Versuchsjahr Nachbauschwierigkeiten infolge wiederholten Anbaus von Zwiebeln in den Behältern auftraten.

5.4.2. Wasserhaushalt

In allen drei Versuchsjahren konnte kein Einfluss der Niederschlagsszenarien auf die Saugspannungsentwicklung in 10, 30 und 50 cm Messtiefe festgestellt werden. Auf eine Darstellung der Werte wird deshalb verzichtet. Die bedarfsgerechte Bewässerung nach dem Behältergewicht hat es verhindert, dass reduzierte Sommerniederschläge Bodentrockenheit hervorrufen konnten.

Bei einem Anbauzeitraum der Zwiebeln von März bis Ende August erhielten die Varianten 2 bis 4 mit reduzierten Sommerniederschlägen in den Monaten März und April zunächst mehr Niederschlag als der Standard Variante 1. Dies bewirkte, dass die Variante 2 "Sommer -10%" während der Zwiebelkultur nur etwa 5% weniger Niederschlag erhielt, die Variante 3 "Sommer -20%" etwa 11% weniger und die Variante 4 "Sommer -40%" etwa 20% weniger im Vergleich zum Versuchsstandard Variante 1 (Tabelle 13 bis Tabelle 15).

2011 konnte die Niederschlagssimulation erst ab April beginnen, die Niederschlagsmengen während der Anbauphase 2011 waren also niedriger als 2012 und 2013. Die Niederschlagsabnahme der Varianten 2 bis 4 war im Jahr 2011 folglich höher als in den beiden folgenden Jahren (Tabelle 13 bis Tabelle 15). Die Unterschiede der variantenspezifischen Niederschlagsmengen zwischen den Jahren 2012 und 2013 beruhen auf geringfügig abweichenden Anbaudaten dieser Jahre.

Im Jahr 2011 waren die Niederschläge der Varianten 2 bis 4 während der Anbauphase um maximal 80 mm im Vergleich zu Variante 1 reduziert, die Bewässerungsmengen stiegen um maximal 34 mm (Tabelle 13). Im Jahr 2012 betrug die Abnahme der Regenmengen maximal 74 mm, die Bewässerungsmenge erhöhte sich um maximal 49 mm (Tabelle 14). Im Jahr 2013 betrug die Abnahme der Regenmengen maximal 86 mm, die Bewässerungsmenge erhöhte sich um maximal 27 mm (Tabelle 15).

Die Sickerwassermengen während der Kultur betrug im Jahr 2011 im Mittel der Versuchsvarianten 15 mm, im Jahr 2012 48 mm und im Jahr 2013 68 mm (Tabelle 13 bis Tabelle 15) und fielen nur im Zeitraum von März bis Mai, 2011 und 2013 auch in geringfügiger Menge auch im Juni an.

Der Wasserverbrauch war im Jahr 2011 bei der Variante 2 "Sommer -10%" mit 605 mm am größten und sank signifikant bei der Variante 4 "Sommer -40%" um 51 mm. Diese signifikante Abnahme des Wasserverbrauchs ging einher mit der signifikanten Ertragsabnahme (Tabelle 13 und Abbildung 39). Im Jahr 2012 sank der Wasserverbrauch der Variante 3 "Sommer -20%" signifikant um 44 mm im Vergleich zum Standard Variante 1 mit 553 mm. Auch 2012 bewirkte diese signifikante Abnahme des Wasserangebots eine signifikante Ertragsabnahme (Tabelle 14 und Abbildung 39). Im Jahr 2013 sank der Wasserverbrauch der Variante 4 "Sommer -40%" signifikant um ca. 50 mm im Vergleich zum Standard Variante 1 mit 580 mm (Tabelle 15).

Tabelle 13: Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2011 (Der Niederschlag wurde 2011 erst ab Mitte April simuliert)

A, B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

1.	Variante	Regen (mm)	Bewässerungsmenge (mm)		Sickerwasser (mm)		Wasserverbrauch (mm)*	
1.	Niederschlag 1971-2000	300	256	B	18,6	a	584	ab
2.	Sommer - 10%	276 (-8%)	286 (+11,7%)	AB	11,3	a	605	a
3.	Sommer - 20%	256 (-14,6%)	280 (+9,4%)	AB	13,7	a	583	ab
4.	Sommer - 40%	220 (-26,6%)	290 (+13,3%)	A	17,0	a	553	b

*: Wasserverbrauch = Regen + Bewässerung - Sickerwasser + Behältergewicht Ende August - Behältergewicht Anfang März

Tabelle 14: Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2012

a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

1.	Variante	Regen (mm)	Bewässerungsmenge (mm)		Sickerwasser (mm)		Wasserverbrauch (mm)*	
1.	Niederschlag 1971-2000	360	193	b	42,5	b	553	a
2.	Sommer - 10%	340 (-5,5%)	202 (+4,8%)	ab	43,7	b	543	a
3.	Sommer - 20%	318 (-11,7%)	188 (-2,6%)	b	52,8	a	509	b
4.	Sommer - 40%	286 (-20,6%)	241 (+25,3%)	a	53,7	a	524	ab

*: Wasserverbrauch = Regen + Bewässerung - Sickerwasser + Behältergewicht Ende August - Behältergewicht Anfang März

Tabelle 15: Wasserhaushalt von Zwiebeln im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2013

a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

1.	Variante	Regen (mm)	Bewässerungsmenge (mm)		Sickerwasser (mm)		Wasserverbrauch (mm)*	
1.	Niederschlag 1971-2000	374	244	b	68,5	a	580	a
2.	Sommer - 10%	354 (-5,3%)	254 (+4,0%)	ab	67,4	a	568	a
3.	Sommer - 20%	332 (-11,2%)	257 (+5,5%)	ab	69,1	a	558	ab
4.	Sommer - 40%	288 (-23,0%)	271 (+11,2%)	a	67,6	a	530	b

*: Wasserverbrauch = Regen + Bewässerung - Sickerwasser + Behältergewicht Ende August - Behältergewicht Anfang März

Abbildung 40 A zeigt den zeitlichen Verlauf der Sickerwasserbildung für die drei Versuchsjahre, jeweils von März bis einschließlich Februar des Folgejahres. Sickerwasserbildung trat in allen drei Versuchsjahren im Wesentlichen von März bis Mai und ab Ende Oktober auf. In den Jahren 2011 und 2013 traten geringfügige Sickerwassermengen bei Variante 1 auch im Juni auf, im Jahr 2013 auch bei den Varianten 2 bis 4.

In allen drei Jahren zeigte die Variante 4 "Sommer -40%" die höchsten Sickerwassermengen. Im Jahr 2011 betrug die maximale Sickerwassermenge 240 mm und lag mit mehr als 50 mm signifikant höher als bei Variante 1 und 2. In den Jahren 2012 und 2013 war die Sickerwassermenge aller vier Varianten signifikant voneinander unterscheidbar. Im Jahr 2012 betrug die maximale Sickerwassermenge 299 mm und lag mit 83 mm signifikant höher als bei Variante 1. Im Jahr 2013 betrug die maximale Sickerwassermenge 315 mm und lag mit 77 mm signifikant höher als bei Variante 1.

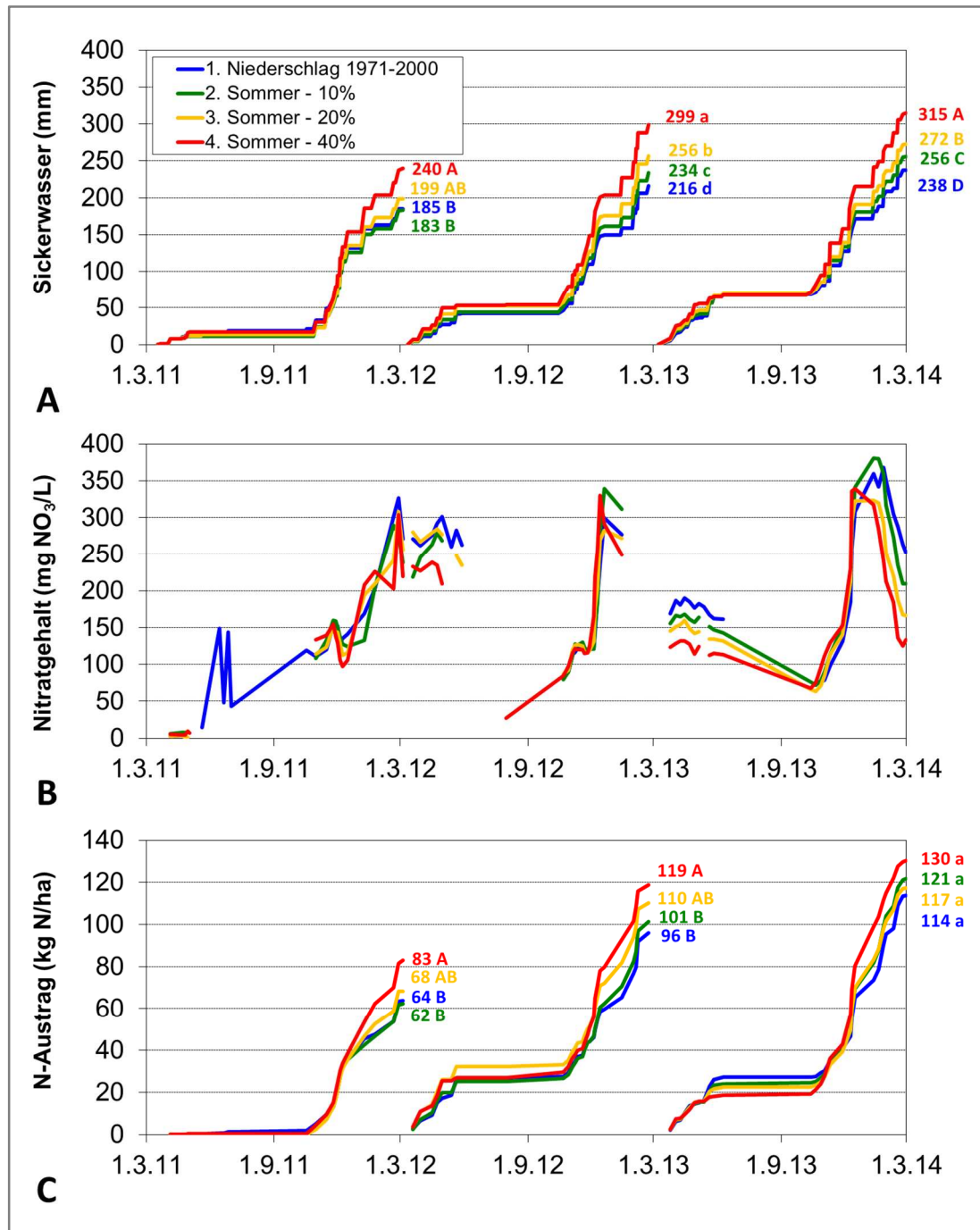


Abbildung 40: A) Zeitlicher Verlauf der Sickerwassermengen (mm), B) der Nitratgehalte (mg NO₃/L) im Sickerwasser und C) des N-Austrags (kg N/ha) bei Zwiebeln im Lysimeter mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien für die Versuchsjahre 2011, 2012 und 2013.

Erhöhte Sickerwassermengen im Frühjahr und ab Oktober spiegeln die Wirkung der Niederschlagsumverteilung in den Winter wider. Die zunehmenden Winterniederschläge der Varianten 2 bis 4 entsprechen den zunehmenden Sickerwassermengen dieser Varianten. Reduzierte Sommerniederschläge wurden durch zunehmende Bewässerungsmengen ausgeglichen. Die Austauschhäufigkeit der Lysimeter nahm mit steigender Niederschlagsumverteilung in den Winter zu: im Jahr 2011 von 2,1 auf 2,7, im Jahr 2012 von 2,4 auf 3,3 und im Jahr 2013 von 2,7 auf 3,5 (Tabelle 16). Da die Sickerwassermengen im Wesentlichen außerhalb der Wachstumsperiode der Zwiebeln auftraten, können diese nicht auf das Bewässerungsmanagement zurückgeführt und deshalb auch nicht durch ein verändertes Bewässerungsmanagement verringert werden.

Tabelle 16: Austauschhäufigkeit von Lysimetern bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien infolge Sickerwasserbildung

a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$;

A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

	Variante	2011		2012		2013	
		Mittelwert	Signifikanz	Mittelwert	Signifikanz	Mittelwert	Signifikanz
1.	Niederschlag 1971-2000	2,1	B	2,4	d	2,7	D
2.	Sommer - 10%	2,0	B	2,6	c	2,9	C
3.	Sommer - 20%	2,2	AB	2,9	b	3,0	B
4.	Sommer - 40%	2,7	A	3,3	a	3,5	A

5.4.3. Stickstoffhaushalt

Abbildung 40 B stellt die Nitratgehalte im Sickerwasser der drei Versuchsjahre dar. Der Nitratgehalt schwankte 2011 zwischen 4 und 326 mg NO₃/L, im Jahr 2012 zwischen 27 und 340 mg NO₃/L und im Jahr 2013 zwischen 63 und 381 mg NO₃/L. Auffallend sind die sehr niedrigen Messwerte im April 2011, für deren Höhe eine Erklärung fehlt.

Abbildung 40 C zeigt die Verläufe des Nitrataustrags der drei Versuchsjahre. In allen drei Versuchsjahren war der Nitrataustrag bei der Variante 4 "Sommer -40%" am höchsten. Die erhöhten Sickerwassermengen und Austauschhäufigkeiten bei diesem Niederschlagsszenario sind ursächlich für die erhöhten N-Austräge. Im Jahr 2011 betrug der Nitrataustrag bei der Variante 4 "Sommer -40%" 83 kg N/ha und lag um ca. 20 kg N/ha signifikant höher als bei Variante 1 und 2. Im Jahr 2012 betrug der Nitrataustrag bei der Variante 4 "Sommer -40%" 119 kg N/ha und lag um ca. 20 kg N/ha signifikant höher als bei Variante 1 und 2. Im Jahr 2013 betrug der Nitrataustrag 114 bis 130 kg N/ha. Die Nitratausträge der vier Varianten waren im Jahr 2013 nicht signifikant unterschiedlich ($p = 0,12$).

Einer jährlichen Stickstoffzufuhr von 210 bis 220 kg N/ha aus Düngung und Ernteresten stehen jährliche N-Abfuhr - der Summe aus N-Entzug und N-Austrag abzüglich der - nicht gemessenen - Veränderungen der N-Gehalte im Boden, von 226 bis 296 kg N/ha gegenüber (Tabelle 17 bis Tabelle 19). Innerhalb aller drei Versuchsjahre unterschieden sich die vier Varianten hinsichtlich N-Zufuhr, N-Entzug und N-Abfuhr nicht signifikant. Die Differenz zwischen N-Ab- und N-Zufuhr betrug 14 und 75 kg N/ha. Da während den Untersuchungen keine Bodenuntersuchungen möglich waren, fehlt der

Nachweis, dass es sich bei diesen N-Mengen um die jährliche Netto-Mineralisierung der Behälter handelt.

Der N-Entzug war im Jahr 2013 mit durchschnittlich 114kg N/ha erheblich niedriger als in den Vorjahren (169 bzw. 186 kg N/ha) und ergab sich aus niedrigeren N-Gehalten in der Pflanzentrockenmasse und den abnehmenden Trockenmassenerträgen des dritten Versuchsjahrs.

Tabelle 17: Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2011

a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

Variante	N-Zufuhr Düngung	N-Zufuhr Laub		N-Entzug		N-Austrag		N-Zufuhr gesamt		N-Abfuhr gesamt		Saldo	
1. Niederschlag 1971-2000	200	21,2	a	171,5	a	63,7	B	221,2	a	235,2	a	-14,1	a
2. Sommer - 10%	200	20,1	a	177,5	a	62,4	B	220,1	a	239,8	a	-19,8	a
3. Sommer - 20%	200	19,3	a	167,9	a	68,3	AB	219,3	a	236,3	a	-17,0	a
4. Sommer - 40%	200	18,0	a	161,1	a	82,9	A	218,0	a	244,0	a	-26,0	a

Tabelle 18: Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2012

a,b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

Variante	N-Zufuhr Düngung	N-Zufuhr Laub		N-Entzug		N-Austrag		N-Zufuhr gesamt		N-Abfuhr gesamt		Saldo	
1. Niederschlag 1971-2000	200	21,6	a	200,2	a	95,9	B	221,6	a	296,1	a	-74,4	A
2. Sommer - 10%	200	22,0	a	195,6	a	101,2	AB	222,0	a	296,9	a	-74,8	A
3. Sommer - 20%	200	22,3	a	171,8	a	110,2	AB	222,3	a	282,0	a	-59,7	A
4. Sommer - 40%	200	22,1	a	176,5	a	118,8	A	222,1	a	295,3	a	-73,2	A

Tabelle 19: Stickstoffhaushalt von Zwiebeln [in kg N/ha] im Lysimeter bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungsszenarien im Jahr 2013a, b: F-Test, Mittelwertvergleich nach Tukey innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$ A,B: Kruskal-Wallis-Test, Mittelwertvergleich nach Bonferroni innerhalb der Jahre, $\alpha = 0,05\%$

Variante	N-Zufuhr Düngung	N-Zufuhr Laub	N-Entzug	N-Austrag	N-Zufuhr gesamt	N-Abfuhr gesamt	Saldo
1. Niederschlag 1971- 2000	200	11,1 a	112,7 a	113,8 a	211,1 a	226,5 A	-15,4 A
2. Sommer - 10%	200	10,9 a	117,2 a	121,7 a	210,9 a	238,8 A	-27,9 A
3. Sommer - 20%	200	11,1 a	118,7 a	117,2 a	211,1 a	235,9 A	-24,8 A
4. Sommer - 40%	200	10,8 a	108,4 a	130,1 a	210,8 a	238,6 A	-27,8 A

5.5. Kostenkalkulation für die Bewässerung im Gemüsebau

Auf Grundlage der Zusatzwassermengen und der Bewässerungshäufigkeit für die Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel konnten die Kosten für die benötigten Wassermengen in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewässerungstechnik berechnet werden. Hierzu wird sich auf zwei Bewässerungstechniken fokussiert. Zum einen die häufig im Hessischen Ried eingesetzte Rohrberegnung und die im Vergleich dazu eher weniger verwendete Tropfbewässerung, die im Gemüsebau aber zum Einsatz kommt. Die Kalkulation der Kosten erfolgte der Vollständigkeit halber und zur besseren Vergleichbarkeit für alle drei betrachteten Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel. Der Vergleich beider Bewässerungstechniken für die drei Kulturen wird zusätzlich noch unter Berücksichtigung des Anbauzeitraumes gezogen, sprich einmal wird ein klassischer Anbau mit Vegetationsperiode von März bis Oktober und festen Aussaatterminen angenommen und zweitens die Annahme einer sich verschiebenden thermischen Vegetationsperiode mit variierenden Aussaatterminen. Die berechneten Kosten setzen sich aus den Wasserkosten sowie den Betriebskosten zusammen (s. Kapitel 4.5.2). und beziehen sich auf die Kosten in Euro pro Jahr und Hektar [$\text{€} / \text{ha} \times \text{a}$], werden nachfolgend jedoch nur in Euro angegeben. Eine detaillierte Übersicht der Kosten geben die Tabelle A 8 und Tabelle A 9 im Anhang.

Bei Betrachtung der kalkulierten Kosten wird deutlich, dass die Tropfbewässerung unabhängig von Kultur und Anbauzeitraum in allen Fällen die wesentlich teurere Variante darstellt. Dieser große Unterschied kommt hauptsächlich durch die Betriebskosten zustande, die bei der Tropfbewässerung generell höher sind. Die Wasserkosten unterscheiden sich nicht zwischen den beiden Bewässerungstechniken, da diese auf der je nach Kultur und Anbauzeitraum ermittelten Zusatzwassermenge basieren, welche wiederum in den Kalkulationen für beide Varianten identisch ist.

Des Weiteren ergibt sich für alle Kulturen ein Anstieg der Kosten für eine Zusatzbewässerung pro Jahr bzw. Vegetationszeit zukünftig (2071 - 2100) bezogen auf die Referenz (1971 - 2000), unabhängig vom zeitlichen Anbauzeitraum und der eingesetzten Bewässerungstechnik. Dies beruht auf der simulierten zukünftigen Niederschlagsumverteilung und den sowohl in der Länge als auch Häufigkeit zunehmenden Trockenperioden (siehe Kapitel 5.1.1. und 5.1.2), da das daraus resultierende zukünftige Defizit durch höhere Zusatzwassermengen ausgeglichen werden muss. Bei Gegenüberstellung der beiden Anbauzeiträume zeigt sich, dass die Kostenzunahme für die Bewässerung zum Teil unterschiedlich stark ausfällt.

Unter dem Aspekt eines klassischen Anbaus steigen bei Einsatz einer Rohrberegnung die berechneten Kosten für die Bewässerung im Vergleich von 2071 - 2100 mit 1971 - 2000 im Modellmittel für Zwiebeln von 525 auf 616 €, für Buschbohne von 156 auf 161 € und für Spargel von 271 auf 300 € pro Anbausatz. Im Vergleich dazu steigen die Kosten bei Einsatz einer Tropfbewässerung für Zwiebeln von 4179 auf 4875 €, für Buschbohne von 1242 auf 1613 € und für Spargel von 2150 auf 4117 € (Tabelle A8).

Unter der Annahme, dass sich die Vegetationsperiode zukünftig verschiebt und demnach der Anbau der Kulturen zeitlich angepasst werden kann, steigen die Kosten im Modellmittel für die Rohrberegnung im Vergleich von 2071 - 2100 zur Referenzperiode bei Zwiebel von 539 auf 574 €, bei Buschbohne von 156 auf 162 € sowie bei Spargel von 249 auf 286 €. Für die Tropfbewässerung steigen die Kosten für die Bewässerung bei Zwiebel von 4284 auf 4512 €, bei Buschbohne von 1242 auf 1456 € sowie bei Spargel von 1975 auf 4636 € (Tabelle A 9).

Im Detail betrachtet wird zudem deutlich, dass sich die Kosten zwischen den beiden Anbauvarianten auch in ihrer Höhe durchaus unterscheiden und durch einen zeitlich variierten Anbau zukünftig zum Teil eine Kostensenkung gegenüber dem klassischen Anbau erzielt werden kann. Jedoch nur unter der Annahme, dass sich an den für die Berechnungen zugrunde gelegten Preisen für Technik und Wasser nichts ändert. Die Kosten für eine Zusatzbewässerung von Zwiebeln (im Modellmittel) betragen bspw. mit Rohrberegnung 2071 - 2100 unter klassischem Anbau 616 €, während bei einem zeitlich angepassten Anbau die Kosten auf 574 € sinken. Für den Einsatz der Tropfbewässerung betragen die Kosten in 2071 - 2100 für den klassischen Anbau 4875 €, für den angepassten Anbau sinken diese auf 4512 €. Diese „Ersparnis“ kann teilweise auch bei den anderen Kulturen sowohl bei Einsatz der Rohrberegnung als auch der Tropfbewässerung beobachtet werden. Allerdings gibt es zwei Ausnahmen, zum einen bei der Buschbohne und zum anderen bei Spargel.

Hinsichtlich einer Rohrberegnung bei Buschbohne kann kein Unterschied bzgl. der Kosten zwischen klassischem und angepasstem Anbau im Mittel über alle Modellkombinationen festgestellt werden. Die Kosten belaufen sich in beiden Varianten auf 156 € in 1971 - 2000 und steigen auf 161 bzw. 162 € in 2071 - 2100 an. Das beruht auf der Tatsache, dass die zeitliche Verschiebung für den Anbau der Buschbohne im Gegensatz zu den anderen Kulturen gering ausfällt, basierend auf den Temperaturanforderungen und der Frostempfindlichkeit der Buschbohne (siehe Kapitel 4.4.2.2). Die zeitliche Variabilität zwischen klassischem und angepasstem Anbau ist demnach nicht groß genug, um einen gravierenden Effekt auf die Bewässerungsmenge sowie -häufigkeit und damit auf die Bewässerungskosten zu haben.

Bei Spargel unter Einsatz einer Tropfbewässerung führt der zeitlich angepasste Anbau zukünftig, bezogen auf 2071 - 2100, im Modellmittel zu einer Erhöhung der Kosten (4636 €) im Vergleich zum klassischen Anbau (4117 €). Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit daran, dass es aufgrund eines festen Enddatums und einem dennoch verfrühten Startdatum zu einer „künstlichen“ Verlängerung der Kulturdauer kommt (s. Kapitel 4.4.2.3). Demzufolge steigen die Bewässerungsmenge sowie die Anzahl der Bewässerungsgaben an, was wiederum automatisch zu höheren Kosten führt.

Auf Grundlage des simulierten Klimawandels kommt es zukünftig zu einem erhöhten Zusatzwasserbedarf und damit verbunden zu einer Erhöhung der Kosten für die Bewässerung. Jedoch sind weniger die Wasser- als vielmehr die Investitions- und Betriebskosten ausschlaggebend.

6. Diskussion

Der Gemüseanbau ist direkt vom Klima abhängig und somit äußerst vulnerabel gegenüber klimatischen Veränderungen. Im Zuge des Klimawandels, gekennzeichnet durch ansteigende Lufttemperaturen, damit verbunden erhöhten Verdunstungswerten sowie einem Rückgang der natürlichen Niederschläge während der Vegetationsperiode, kommt es zukünftig zu einer Entwicklung hin zu trockeneren Verhältnissen. Der Gemüsebau mit vorwiegend berechnungswürdigen Kulturen steht ausgehend von dieser Entwicklung daher vor einigen Problemen, da zukünftig ein erhöhter Wasserbedarf die Folge sein kann.

Das Hessische Ried ist eine wichtige Gemüseanbauregion und ein wesentliches Kriterium für eine intensive gemüsebauliche Nutzung dieser Region stellt die Möglichkeit zur Bewässerung dar, denn die Bewässerung ist eine der effektivsten Maßnahmen zur Ertragssicherung. Daher ist Wasser bzw. dessen Verfügbarkeit im Hessischen Ried ein unverzichtbarer Produktionsfaktor. Jedoch ist insbesondere die landwirtschaftliche Bewässerung bzw. die wirtschaftliche Nutzung der Wasserressourcen ein Gegenstand von Konflikten, denn Wasser gehört zu den Ressourcen, die für viele Bereiche verstärkt genutzt wird. Aufgrund der intensiven Nutzung und der damit vielerorts zu beobachtenden Absenkung des Grundwasserspiegels (Kirby et al. 2015, Hunink et al. 2015, Erban & Gorelick 2016) kommt es bereits heute zu Konflikten hinsichtlich der Verwendung von Grundwasser zur Deckung des Zusatzwasserbedarfs. Der Klimawandel kann zu einer weiteren Verschärfung dieser Situation führen.

6.1. Klimatische Veränderungen im Hessischen Ried

Die Auswirkungen des Klimawandels können sich auf regionaler und lokaler Ebene in Art und Ausmaß sehr vielfältig unterscheiden. Für das Hessische Ried zeigen die vorliegenden Simulationen eine große Bandbreite möglicher zukünftiger Veränderungen. Für die Summe der Jahresniederschläge zeigen die betrachteten Klimamodelle übereinstimmend nur geringe Veränderungen zwischen + 1,4 % bis - 4,3 % für 2071 - 2100 im Vgl. mit 1971 - 2000. Allerdings weisen sie eine Tendenz zu einer Niederschlagsumverteilung auf. Alle innerhalb der Studie verwendeten regionalen Klimamodelle berechnen bis 2100 eine Abnahme der sommerlichen Niederschläge bis zu 24 %. Die Zunahme der winterlichen Niederschläge liegt bei bis zu 18 % (Tabelle 11). Vom Trend der Niederschlagsumverteilung ausgehend ergibt sich bis zum Ende des Jahrhunderts zudem eine Zunahme sowohl der Häufigkeit von niederschlagsfreien Tagen bzw. Perioden (Abbildung 11) als auch eine Verlängerung dieser innerhalb der Vegetationsperioden (Abbildung 10).

Die höheren Temperaturen, welche einhergehend mit zunehmender Globalstrahlung einen zukünftigen Anstieg der Verdunstung zur Folge haben, führen zu einer zunehmend negativen klimatischen Wasserbilanz innerhalb der Vegetationszeit. Die KWB weist innerhalb der Vegetationsperiode im Vergleich von 2071 - 2100 zur Referenz 1971 - 2000 eine Abnahme von rund 139 mm (C-CLM ECHAM5), 179 mm (C-CLM HadCM3), 99 mm (REMO) bzw. 177 mm (WETTREG 2010) auf, während außerhalb der Vegetationsperiode die Zunahme gerade mal 36 mm (C-CLM ECHAM5), 38 mm (C-CLM HadCM3), 29 mm (REMO) bzw. 57 mm (WETTREG 2010) beträgt (s. Abbildung 12). In Kombination mit der Niederschlagsumverteilung sowie der Zunahme von niederschlagsfreien Perioden lassen gerade diese Tendenzen die Vegetationszeit bis Ende des Jahrhunderts erheblich trockener werden, woraus sich wiederum auch Defizite in der Wasserverfügbarkeit für die Kulturpflanzen ergeben.

6.2. Konsequenzen einer veränderten Vegetationszeit und Pflanzenentwicklung

Das Klima spielt als Umweltfaktor eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der Pflanzen. In Anbetracht der simulierten klimatischen Veränderungen im Hessischen Ried, ist ebenso eine Beeinflussung der pflanzlichen Entwicklung anzunehmen, da diese auf die Gesamtheit der Witterungserscheinungen reagieren (Schnelle 1955). Ein wichtiger abiotischer Umweltfaktor in Bezug auf das Pflanzenwachs-

tum ist die Temperatur. Demzufolge können die Veränderung dieses Faktors sowie die damit verbundenen klimatischen Schwankungen einen enormen Einfluss auf die Entwicklung haben, da diese maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt wird. Der potentielle Zeitraum für das Wachstum der Pflanzen kann auf Grundlage der thermischen Vegetationsperiode definiert werden. Der Einfluss der klimatischen Entwicklung im Hessischen Ried auf die zukünftigen thermischen Vegetationsperioden wiederum ermöglicht eine Abschätzung der damit verbundenen möglichen Anbauzeiträume von Gemüse in der Region.

Hinsichtlich einer Verschiebung der Vegetationsperiode in Hessen gibt es bereits eine Vielzahl von Hinweisen (Grünhage et al. 2005, Chen 1994). Die Ergebnisse der Modellsimulationen zeigen, dass sich die thermischen Vegetationsperioden im Hessischen Ried zeitlich verschoben haben (Abbildung 13). In 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenz verfrüht sich der Beginn der thermischen Vegetationsperioden um 39 Tage (C-CLM ECHAM5 und REMO ECHAM5) bzw. 42 Tage (C-CLM HadCM3 und WETTREG 2010 ECHAM5) und das Ende verschiebt sich um 29 Tage (C-CLM ECHAM5), 30 Tage (C-CLM HadCM3), 36 Tage (REMO ECHAM5) bzw. 37 Tage (WETTREG 2010 ECHAM5) nach hinten. Insgesamt simulieren die verwendeten Regionalmodelle eine signifikante Verfrühung des Starttermins sowie eine signifikante Verspätung des Endtermins, also eine Verlängerung der thermischen Vegetationsperioden im Hessischen Ried.

Berücksichtigt man die zeitliche Verschiebung der thermischen Vegetationsperioden auf die möglichen Anbauzeiträume, so ergibt sich die Möglichkeit, den Anbau der einzelnen Kulturen entsprechend den klimatischen Veränderungen anzupassen, wobei jedoch einige kulturspezifische Besonderheiten wie bspw. die Frostempfindlichkeit bei Buschbohne unbedingt berücksichtigt werden müssen (vgl. Kapitel 4.4.2 ff.). Diesbezüglich hat sich gezeigt, dass durch die Verschiebung der thermischen Vegetationsperioden eine Verfrühung des Anbaus für die drei in dieser Studie betrachteten Kulturen möglich ist (Abbildung 26, Abbildung 30, Abbildung 34). Allerdings hat sich herausgestellt, dass diese bei der Buschbohne wesentlich geringer ausfällt, wobei die Ursache bei der Frostempfindlichkeit liegt. Die Berücksichtigung eines Temperaturschwellenwertes von $> 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und des Auftretens von Frostereignissen führt dazu, dass auf Grundlage des Modelloutputs zwar ein verfrühter Aussattermin möglich ist, dieser aber im Vergleich zu den beiden anderen Kulturen nicht so stark vom gegenwärtigen Termin abweicht.

Mit Veränderung der zukünftig thermischen Vegetationsperioden geht also auch eine Veränderung des möglichen Anbauzeitraumes einher. Ein sich verfrühendes und insgesamt verlängerndes Zeitfenster, in dem potentiell Gemüse angebaut werden kann, hat großen Einfluss auf den zukünftigen Wasserbedarf, insbesondere aufgrund der klimatischen Bedingungen innerhalb dieses Zeitraumes wie bspw. das Vorkommen natürlicher Niederschläge.

Zur Abschätzung des zukünftigen kulturspezifischen Zusatzwasserbedarfs sind vorab noch die Auswirkungen auf die einzelnen kulturspezifischen Wachstumsphasen von großem Interesse, denn je nach Pflanzenart bestehen Unterschiede im Wasserbedarf in den verschiedenen phänologischen Phasen von Wachstum und Entwicklung. Für die Beurteilung von klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Entwicklung der Kulturen im Hessischen Ried stellen die Beschreibungen ihrer phänologischen Entwicklungsstadien in Abhängigkeit von der Temperatur gute Indikatoren dar. Der zeitliche Wachstumsverlauf während der Kulturdauer kann auf Grundlage von Temperatursummen in Kombination mit phänologischen Daten der Kulturen aus Freilandversuchen in Geisenheim definiert und beschrieben werden (s. Kapitel 4.3.1).

Die Reaktion der einzelnen Kulturen auf eine simulierte Temperaturerhöhung äußert sich in einem zukünftig schnelleren Eintreten der jeweiligen Entwicklungsstadien, wobei nicht alle Kulturen bzw. Stadien im gleichen Ausmaß mit einer früheren Entwicklung reagieren (Kapitel 5.3.2, insbesondere Abbildung 14, Abbildung 18 und Abbildung 22 sowie Abbildung 26, Abbildung 30 und Abbildung 34).

Generell ist der Trend einer zunehmend früheren und auch schnelleren pflanzlichen Entwicklung aber eindeutig. Dies hängt im Rahmen des Klimawandels stark mit der projizierten Temperaturerhöhung zusammen, da die benötigten Schwellenwerte (basierend auf Temperatursummen) für den jeweiligen Eintrittstermin schneller erreicht werden. Die Stadien reagieren somit auf die erhöhten Temperaturen. Für den klassischen Anbau zeigt sich, dass sich die Kulturdauer somit insgesamt verkürzt. Allerdings zeigen sich unterschiedliche Auswirkungen auf die zukünftige Kulturdauer der einzelnen Kulturen bei einem zeitlich adaptierten Anbauzeitraum. Für Zwiebel führt dies zukünftig zu einer insgesamt verlängerten Kulturdauer, während sich diese bei der Buschbohne geringfügig verkürzt. Für Spargel lassen sich keine konkreten Aussagen dazu treffen, da das Kulturende mit einem festen Termin zusammenhängt, sodass diesbezüglich der Einfluss des Klimawandels nicht eindeutig feststellbar ist.

6.3. Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf für den Gemüsebau

Im Hessischen Ried wird in großem Umfang Gemüse angebaut (s. Kapitel 4.1.3). Das Wasser für die Bewässerung stammt überwiegend aus dem Grundwasser (s. Kapitel 4.1.4). Die Möglichkeit zur Nutzung des Grundwassers für die landwirtschaftliche Bewässerung ist in vielen Gebieten eine essentielle Voraussetzung, wobei diese den Wasserhaushalt auf lokaler und/oder regionaler Ebene beeinflusst.

In Anbetracht der Annahmen, dass es in der Region Hessisches Ried zukünftig wärmer wird, weniger natürliche Niederschläge vorhanden sind, Gemüse bereits einen hohen Wasserbedarf aufweist und sich daher für diese Sonderkultur ein erhebliches Wasserdefizit ergeben kann, stellt sich die Frage, inwieweit zukünftig der Gemüseanbau und die notwendige Zusatzbewässerung gesichert werden können. Dabei gilt zu prüfen, inwiefern sich sowohl die Verschiebung der Anbauzeiträume als auch die veränderte pflanzliche Entwicklung auf die Höhe des Zusatzwasserbedarfs auswirken können.

Diesbezüglich wurde näher betrachtet, wie sich der Zusatzwasserbedarf der Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel zukünftig darstellt. Neben den Unterschieden bezüglich der Höhe des Zusatzwasserbedarfs zwischen den einzelnen Kulturen sind auch Unterschiede hinsichtlich der Auswirkungen auf die Biomasseproduktion (Ertrag) bei Wasserüberschuss oder -mangel zu erwarten. Ein wichtiger Faktor stellt dabei die Transpiration dar, da zwischen Transpiration und Biomasseproduktion ein linearer Zusammenhang besteht. Für Gemüse konnte durch Hartmann et al. (2000) nachgewiesen werden, dass eine starke Abhängigkeit der Trockenmasseproduktion vom Wasserverbrauch besteht. Ausgehend von diesem engen Zusammenhang stellt sich folglich die Frage, wie viel und wann die Kulturen Zusatzwasser benötigen, um hinsichtlich der Wasserversorgung eine optimale Ertragsbildung gewährleisten zu können. Diesbezüglich lag der Fokus auf der Bewässerungssteuerung, bei der ein bedarfsgerechter Zusatzwassereinsatz im Vordergrund steht.

Die Ergebnisse bezüglich des Wasserbedarfs der Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel zeigen, dass zwischen den einzelnen Kulturen erhebliche Unterschiede im Wasserverbrauch bestehen (Tabelle 12). Den höchsten zukünftigen Wasserbedarf (2071 - 2100) innerhalb der Vegetationsperiode (März bis Oktober) weist die Kultur Zwiebel mit durchschnittlich 252 mm auf, gefolgt von Spargel mit 223 mm. Buschbohne hat mit ca. 85 mm den geringsten Wasserbedarf. Insgesamt kristallisiert sich heraus, dass Kulturen mit längeren Kulturzeiten generell einen höheren Wasserbedarf aufweisen als Kulturen mit kürzeren Kulturdauern, gleiche klimatische Rahmenbedingungen vorausgesetzt. Dieser Gesamtwasserverbrauch hängt demnach stark von der Kulturdauer ab, wobei der Anbauzeitraum auch eine wesentliche Rolle spielt.

Hinsichtlich eines klassischen Anbauzeitraumes innerhalb der Vegetationsperiode führt der Klimawandel im Hessischen Ried zwar zu einer Verkürzung der Kulturdauer bei Zwiebel und Buschbohne, allerdings aber zu einem Anstieg des Wasserbedarfs, da die Temperatur als treibendes Steuerelement auf den Wasserhaushalt, insbesondere auf die Verdunstung zunimmt.

Allgemein ist zu erwarten, dass die Verschiebung der Aussaattermine und damit einhergehend eine Vorverlegung des Anbauzeitraumes einen positiven Einfluss auf den kulturspezifischen Wasserbedarf haben wird, wenn sich der Anbauzeitraum weit genug nach vorn ins Jahr verschiebt. Hier kann dann von der Niederschlagsumverteilung sowie den geringeren Temperaturen profitiert werden. Die Ergebnisse bezogen auf den Zeitraum 2071 - 2100 weisen darauf hin, dass die Verschiebung des Kulturzeitraums für Zwiebeln um durchschnittlich 42 Tage früher ins Jahr den kulturspezifischen Wasserbedarf um 21 mm (von 252 auf 231 mm) reduzieren kann, obwohl eine Verlängerung der Kulturdauer, zum einen im Vergleich mit dem klassischen Anbau und zum anderen zukünftig im Vergleich zu 1971 - 2000, auftritt. Für Buschbohne ergeben sich auch im angepassten Anbau eine Verkürzung der Kulturdauer sowie eine Reduzierung des Wasserbedarfs um immerhin 10 mm (von 85 auf 75 mm) bei einer Verfrühung um ca. 12 Tage.

Die Ergebnisse zum Wasserbedarf im Bezug zur Kulturdauer und der Anbauvariante für Spargel sind aufgrund der Datengrundlage und den damit verbundenen methodischen Einschränkungen nicht ausreichend interpretierbar, um eine Stellungnahme bzgl. des Wasserbedarfs abzugeben oder einen brauchbaren Vergleich mit den anderen Kulturen herbeizuführen. Durch die festen Termine für Start und Ende des betrachteten Kulturzeitraumes im klassischen Anbau ergeben sich gleichbleibende Kulturlängen in den 30jährigen Perioden von 140 Tagen. Der Wasserbedarf lag 1971 - 2000 im Mittel über alle Modelle bei 109 mm und erhöhte sich 2071 - 2100 auf 223 mm. Die Kulturverlängerung sowie der Anstieg des Wasserbedarfs im zeitlich angepassten Anbau sind begründet durch den verfrühten Starttermin in Kombination mit dem unveränderten Endtermin.

Zusammenfassend zeigt sich, dass einhergehend mit dem Temperaturanstieg, unabhängig von der Anbauvariante, der Wasserbedarf für die Kulturen zukünftig ansteigt. Weiterhin bestätigen die Ergebnisse, dass durch eine Verschiebung bzw. Anpassung des zukünftigen kulturspezifischen Anbauzeitraumes in begrenztem Umfang Zusatzwasser im Vergleich zur herkömmlichen Anbauvariante eingespart werden kann. Dies ist mit Sicherheit auch auf andere Kulturen übertragbar, allerdings muss dies für jede Kultur im Einzelnen überprüft werden, da besonders die kulturspezifischen Anforderungen an den Anbauzeitraum, wie bspw. die Frostempfindlichkeit bei Buschbohne, einen großen Einfluss darauf haben, inwiefern eine zeitliche Verschiebung des Anbauzeitfensters möglich ist.

Generell ist bei den untersuchten Kulturen zukünftig ein Anstieg des Zusatzwasserbedarfs gegeben, was die Notwendigkeit einer Bewässerung für eine entsprechend qualitative und quantitative Produktion verdeutlicht. Daher ist es auch in Zukunft erforderlich, dass ausreichend Wasser für den Ausgleich des Defizits und zur Deckung des Zusatzwasserbedarfs zur Verfügung steht. Jedoch kann ein zukünftig steigender Bedarf an Zusatzwasser die lokale Verfügbarkeit des Grundwassers reduzieren. Eine Untersuchung zur Grundwasserneubildung im Hessischen Ried hat gezeigt, dass die Grundwasserneubildung dort im langjährigen Mittel (1971 - 2000) mit 96 mm/a niedriger als das Hessenmittel ausfällt und sich zum Ende des Jahrhunderts hin höchstens eine leichte Zunahme der Grundwasserneubildung andeutet (Berthold 2005, 2010). Bisher wird davon ausgegangen, dass die Umverteilung der Niederschläge, also die zukünftig erhöhten Winterniederschläge, dazu beitragen, die Grundwasserspeicher wieder ausreichend aufzufüllen. Allerdings muss der Gemüsebau in der Vegetationszeit kurzfristig auf Witterungsveränderungen reagieren, weshalb witterungsbedingte Schwankungen der Grundwasserstände im Rahmen der Sicherstellung der Bewässerung zu Konflikten mit anderen Nutzern führen können. Im Zusammenhang mit der simulierten klimatischen Veränderung im Ried zu trockeneren Verhältnissen innerhalb der Vegetationszeit könnte zukünftig ein erhöhtes Konfliktpotential die Folge sein.

6.4. Nitrataustrag ins Grundwasser (Modellversuch Lysimeter)

Ein kritisch diskutierter Aspekt neben der mengenbezogenen Nutzung des Grundwassers zur landwirtschaftlichen Bewässerung ist die Gefährdung der Grundwasserqualität durch den unerwünschten,

übermäßigen Eintrag von Stoffen, vorwiegend Nitrat. Die in der EU-Grundwasserrichtlinie 2006/118/EG (GWRL) für Grundwasser europaweit einheitlich festgelegte Qualitätsnorm von 50 mg Nitrat je Liter wurde in der deutschen Grundwasserverordnung (GrwV) als Schwellenwert verankert. Im Zusammenhang mit dem Grundwasserschutz wird oft diskutiert, inwiefern die Bewässerung die Auswaschung von Nährstoffen begünstigt, wenn von einer zukünftigen Entwicklung zu trockeneren Verhältnissen im Rahmen des Klimawandels und damit von einer verstärkten Bewässerung ausgegangen wird. Ausgehend von den gemessenen mittleren Nitratgehalten der Grund- und Rohwässer in Hessen im Jahr 2015 (siehe Abbildung A 4) zeigt sich, dass im Hessischen Ried der Grenzwert von 50mg/l vereinzelt bereits überschritten wird.

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels bei Bewässerung und unter klimawandelbedingten Niederschlagsumverteilungen auf die Nitratauswaschung aus gemüsebaulich genutzten Böden wurde in einem Lysimeterversuch mit Zwiebeln untersucht (s. Kapitel 4.6). Für die Untersuchung von Stoffverlagerungen sind Lysimeter geeignet, da die Wasserflüsse sowie Stofftransporte unter kontrollierten Randbedingungen quantifiziert werden können. Sowohl kurzfristige Verlagerungsprozesse als auch Langzeitverhalten von Nährstoffen können im Lysimeter unter standardisierten Bedingungen überprüft werden. Im Fokus standen dabei zum einen die Erträge und der Bewässerungsbedarf sowie die Sickerwasserbildung und der Nitrataustrag.

Die höchsten Erträge traten bei Variante 2 (10% reduzierter Niederschlag) in einem Wertebereich von 10,6 bis 11,7 kg/m² auf. Die Annahme, dass mit zunehmender Niederschlagsumverteilung auch eine Reduzierung der Erträge einhergeht, konnte im dreijährigen Lysimeterversuch nicht bestätigt werden. Nur im ersten Versuchsjahr reduzierten sich die Erträge signifikant in Variante 4 (40% reduzierter Niederschlag). Die relativ unveränderten Erträge sind im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass das Niederschlagsdefizit durch die Bewässerung nach Geisenheimer Steuerung ausgeglichen werden konnte und somit kein gravierender Einfluss auf den Ertrag beobachtet werden konnte.

Der Bewässerungsbedarf der Zwiebeln im Lysimeter erhöhte sich mit zunehmendem Niederschlagsdefizit bei allen Varianten. In Variante 4 stieg dieser auf bis zu 605 mm an und war damit maximal 25% höher als in der Kontrollvariante (Variante 1). Die Sickerwassermenge in Variante 4 betrug 300 mm und war somit im Mittel dreimal höher als in Variante 1. Dementsprechend stieg auch die Nitratauswaschung mit zunehmender Niederschlagsumverteilung bzw. erhöhter Sickerwassermenge an. Das Minimum lag bei 96 kg N in Variante 1 und betrug in Variante 4 maximal 130 kg N im dritten Versuchsjahr.

Des Weiteren wurde das Auswaschungsrisiko durch die Analyse der relativen Austauschhäufigkeit des Bodenwassers bestimmt. Die Austauschhäufigkeit beschreibt, wie oft das vorhandene Wasser in der belebten Bodenzone und die in ihm gelösten Stoffe durch den Sickerwasserfluss ausgetauscht wird. Umso geringer das Wasserspeichervermögen eines Bodens ist, desto größer ist bei gleicher Sickerwassermenge die Austauschhäufigkeit. Je höher die Austauschhäufigkeit, desto kürzer ist die Verweilzeit des Wassers im Boden. Somit erhöht sich bei hohen Austauschraten das Risiko eines Austrages von leicht löslichen Stoffen wie z.B. Nitrat. Die Austauschhäufigkeit im Lysimeterversuch stieg in den drei Versuchsjahren von 2,1 bis 2,7 für Variante 1 (Kontrolle) auf 2,7 bis 3,5 in Variante 4 und ist somit generell als hoch einzustufen. Dies bedeutet weiterhin, dass der Bodenwassergehalt in Variante 4 im Vergleich mit der Kontrolle im Durchschnitt aller Versuchsjahre ca. 24% häufiger ausgetauscht wurde.

Die Erkenntnisse aus dem dreijährigen Lysimeterversuch zeigen demnach, dass ausgehend von einer Umverteilung der Niederschläge um bis zu 40% ein erhöhtes Risiko für die Nitratauswaschung bei Anbau von Zwiebeln auf sandigem Lehm besteht.

Um die im Lysimeterversuch gemessenen Nitratkonzentrationen hinsichtlich der zu erwartenden Belastung von Grund- und Oberflächenwasser bewerten zu können, müssen die herbstlichen Rest-Nmin-Gehalte, sprich die Nmin-Gehalte nach Vegetationsende, betrachtet werden. Diese Nmin-Werte beschreiben den Gehalt an Nitrat in der Wurzelzone (0 - 90 cm) zu Beginn der Sickerwasserbildung im Winterhalbjahr. Durch Nitrifikation liegen leicht lösliche NO_3 -Anionen vor, die mit dem Sickerwasser aus der Wurzelzone in das Grundwasser verlagert werden. Daher sollte die Nitratkonzentration den Grenzwert nach Trinkwasserverordnung von 50 mg/l nicht überschreiten. Aus dieser Vorgabe lassen sich dann je nach Bodenart und Sickerwasserrate maximal tolerierbare Herbst-Nmin-Werte ableiten. Im Hessischen Ried mit vorwiegend sandigen Böden und einer Sickerwasserrate im Bereich zwischen < 100 und 100 - 200 mm/a liegen die tolerierbaren Rest-Nmin-Gehalte zwischen 15 und 20 kg N/ha (90 cm Boden) (s. Tabelle A 10, verändert nach Hennings und Scheffer, 2000). Im Bewirtschaftungsplan WRRL wurde als Zielwert hinsichtlich der Herbst-Nmin-Gehalte ein Wert von < 30 kg N/ha (90 cm Boden) pro Jahr eingeführt. Damit liegen die tolerierbaren Rest-Nmin-Gehalte für das Hessische Ried mit 15 bis 20 kg N/ha weit unter dem angesetzten Zielwert.

Nach diesen Maßstäben müssen die aufgetretenen Nitratgehalte im Sickerwasser (Abbildung 40 B) sowie Nitratausträge (Abbildung 40 C) im Lysimeterversuch hinsichtlich der Belastung als nicht mehr tolerierbar eingestuft werden, da in allen drei Versuchsjahren die Werte aus allen 4 Varianten nach Vegetationsende über den tolerierbaren Zielwerten liegen.

Untersuchungen im Rahmen des Bewirtschaftungsplans 2015 - 2021 haben gezeigt, dass ein Großteil der Herbst-Nmin-Gehalte im Mittel der Jahre 2012 bis 2014 über 40 kg N/ha liegt und teilweise 60 kg N/ha überschritten wurden. Durchgeführte Analysen der Grundwässer haben gezeigt, dass von insgesamt 440 Grundwassermessstellen in Hessen bei 17 (ca. 4%) steigende Tendenzen hinsichtlich der Nitratkonzentrationen festgestellt werden konnten. Im Gegensatz dazu wurden bei 22 (ca. 5,5%) fallende Tendenzen festgestellt. Für den Großteil der Grundwässer (91,5%) traten keine Veränderungen hinsichtlich der Nitratkonzentrationen auf. Allerdings zeigte sich, dass vor allem in Gebieten mit intensiver Landwirtschaft hohe Rest-Nmin-Gehalte im Boden angetroffen werden und daher in diesen Gebieten immer noch steigende bzw. stagnierende Nitratgehalte im Grundwasser auftreten.

Eine wesentliche Ursache für das Auftreten hoher Rest-Nmin-Gehalte im Herbst ist eine zu hohe Stickstoff-Düngung. Im Lysimeterversuch weisen das nahezu gleichbleibende Ertragsniveau und der dabei aber gleichzeitig erhöhte N-Austrag darauf hin, dass ca. die Hälfte der eingesetzten Düngung nicht durch die Zwiebeln dem Boden entzogen worden sind. Dies lässt vermuten, dass eine Reduzierung der Stickstoffdüngung für Zwiebeln durchaus denkbar wäre, um somit die Nitratausträge durch verbleibende, auswaschungsgefährdete Nmin-Reste im Boden zu vermindern. Des Weiteren machen die Ergebnisse deutlich, dass eine Umverteilung der Niederschläge keinen feststellbar negativen Einfluss auf die Erträge hat, wenn eine bedarfsgerechte Bewässerung nach Geisenheimer Steuerung unter Einbeziehung der nFK zur Anwendung kommt.

Eine Reduzierung der Nitratausträge durch die Anpassung des Bewässerungsmanagements stellt ausgehend von den vorliegenden Versuchsergebnissen keine relevante Maßnahme dar. Ein direkter Zusammenhang zwischen einer Senkung der Bewässerungsschwellen (d.h. eine noch niedrigere Schwelle als 60 % nFK zum Durchführen einer Bewässerung sowie eine Verminderung der Auffüllschwelle von 90% nFK) und einer Verminderung des Nitrataustrags kann nicht hergeleitet werden. Sowohl die Sickerwasserbildung als auch die Nitratausträge fanden vorwiegend in den Herbst-/Wintermonaten, also nach Vegetationsende und daher außerhalb des Bewässerungszeitraums, statt. Daher ist nicht davon auszugehen, dass eine Anpassung des Bewässerungsmanagements im Rahmen des vorliegenden Versuchs zu einer Reduzierung der Austräge führen würde. Die Ergebnisse legen eher nahe, dass die hohen bzw. zukünftig erhöhten Winterniederschläge zu einem Anstieg der Austräge führen. Des Weiteren lässt sich vermuten, dass die zukünftig abnehmenden Sommerniederschläge und die damit verbundene zunehmende Sommertrockenheit dazu führen, dass die Düngung

nicht ausreichend von den Pflanzen verwertet werden kann und ein großer Teil als auswaschungsgefährdeter N_{min}-Rest im Boden verbleibt.

Die im Modellversuch gefundenen N-Austräge lassen sich aufgrund des Charakters von Gefäßversuchen nicht in ihrer absoluten Höhe interpretieren. Jedoch ermöglicht der Vergleich des Nitrataustrags von Zwiebeln im Lysimeter mit dem von gemüsebaulich intensiv genutzten Flächen von verschiedenen Kulturen, angebaut im Freiland, eine relative Abschätzung, welche relative Zunahme bei diesen Kulturen gegenüber der Zwiebelspezifischen Veränderung auftreten könnte. Untersuchungen zur Nitratkonzentration im Sickerwasser sowie zum Nitrataustrag gemüsebaulich genutzter Flächen unter Berücksichtigung verschiedener Gemüsekulturen, Böden und Klimabedingungen hat gezeigt, dass unter den Bedingungen der intensiven Pflanzenproduktion im Gemüsebau einseitige Gemüsefruchtfolgen, ein hoher N-Bedarf der Kulturen sowie hohe N-Mengen in den Ernterückständen einer höheren Stickstoffausnutzung entgegenstehen (Armbruster 2010 und 2013). Zur Verdeutlichung: Kulturen, die nach der Ernte eine große Menge an leicht zersetzbarer organischer Substanz auf der Fläche hinterlassen (z.B. Kartoffel) sind kritischer zu betrachten als bspw. Zwiebeln. Denn höhere N-Rückstände nach Kulturrende erhöhen das Auswaschungsrisiko. Spätestens bei der Frage nach möglichen Maßnahmen zur Reduzierung des N-Austrags wird deutlich, dass in so einem Fall die Maßnahmen wesentlich intensiver ausfallen müssten (Armbruster 2013).

6.4.1. Maßnahmen zur Reduzierung des Nitrataustrags

Der Austrag von Nitrat ist von vielen Faktoren abhängig. Zum einen hängt dies vom Boden (Bodenart und -relief, Wasserhaltevermögen) und der Witterung (Niederschlagsmenge und -verteilung, Temperatur, Verdunstung) ab. Weiterhin spielen noch die Bodennutzung, das Düngemanagement (Menge und Zeitpunkt, Ausbringungstechnik) und die Bodenbearbeitung eine wichtige Rolle. Die beiden Faktoren Boden und Klima sind durch den Standort bedingt und können nicht direkt beeinflusst werden. Es bestünde die Möglichkeit, das Risiko eines Nitrataustrags zu verringern, indem Auswaschungsgefährdete Standorte für den Gemüseanbau vermieden werden bzw. der Standort nach bestimmten Kriterien ausgewählt wird. Demnach kämen für den Gemüseanbau unter dem Aspekt der Nitrataustragsreduzierung Standorte mit geringer Wasserkapazität und schnellem vertikalen Stofftransport oder Standorte mit hoher WK und langsamen vertikalen Stofftransport in Frage. Dies ist in der Praxis jedoch nur eingeschränkt möglich, da der Landwirt nicht unbegrenzt Flächen zur freien Verfügung hat. Daher ist es umso wichtiger, produktionstechnische Möglichkeiten zur Verminderung der Nitratauswaschung (z. B. bedarfsgerechte Düngung, Winterbegrünung) voll auszuschöpfen.

Ein sehr wichtiger Aspekt ist der sorgfältige Einsatz der Bewässerung zur Vermeidung der Nitratauswaschung. Eine gute Wasserversorgung der Pflanzen kann zum einen die Nährstoffaufnahme-fähigkeit der Pflanzen und zum anderen die Nährstoffverfügbarkeit aus dem Boden verbessern (Ehlers 1996). Umso besser die Bodenfeuchte, desto mehr Stickstoff wird im Boden mineralisiert und steht damit den Pflanzen zur Verfügung. Diese können den Stickstoff bei guter Wasserversorgung wiederum wesentlich besser aufnehmen. Zusätzlich kann eine gesteuerte Bewässerung dazu beitragen, den Wasserverlust durch Versickerung zu minimieren, wenn frühestens bei einer nFK $\leq 60\%$ bewässert wird und die Bodenfeuchte 90% nFK nicht überschreitet. Versuchsergebnisse aus anderen Studien (Fricke 2009) belegen, dass eine Beregnung, insbesondere in Trockenperioden, den qualitativen Grundwasserschutz begünstigen können. Während der Vegetationszeit führt eine Bewässerung zu einer besseren Verfügbarkeit der Nährstoffe für die Pflanzen, was höhere Nährstoffentzüge aus dem Boden zur Folge hat. Folglich ist die potenzielle Gefahr einer Nährstoffauswaschung geringer.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist neben der bedarfsgerechten Bewässerung auch eine bedarfsgerechte Düngung. Ein kulturbegleitendes N_{min}-Sollwert-System kann die Auswaschungsverluste um bis zu 50% vermindern. Die nach einer Gemüsekultur verbleibenden N-Rückstände im Boden können durch das Einbeziehen von Sommer- bzw. Winterzwischenfrüchten oder durch die Aufnahme von Getreide

in die Fruchtfolge verringert werden, indem diese Kulturen dem Boden die N-Rückstände entziehen. Da das Auswaschungsrisiko vorwiegend im Winter besteht, sollte die Kulturführung dahingehend angepasst werden, dass die Nährstoffmobilisierung im Herbst möglichst unterbleibt und damit die Auswaschungsgefährdung über das Winterhalbjahr so gering wie möglich ist. Dabei stellen eine Winterbegrünung zur organischen Bindung von N sowie ein Zwischenfruchtanbau geeignete Maßnahmen dar. Ebenso kann das Auswaschungsrisiko verringert werden, indem ein Anbau von düngungsintensiven Kulturen spät im Jahr vermieden wird. Ebenso könnten die Ernterückstände von Kulturen mit geringer N-Abfuhr (Blumenkohl, Brokkoli) zur Biogasverwertung genutzt werden (Armbruster et al. 2013).

Zur wirksamen Verringerung des Auswaschungsrisikos und damit der Gewässerbelastung im Gemüsebau ist ein integriertes Stickstoffmanagement, welches eine Kombination der Maßnahmen umfasst, zu empfehlen. Im Vordergrund sollten dabei ressourcen- und grundwasserschonende Bewässerungs- und Düngungsstrategien stehen. Ziel sollte dabei ebenso eine Steigerung der Effizienz des Stickstoffeinsatzes sein. Für die Praxis stehen dabei einige objektive Entscheidungshilfesysteme wie bspw. die Geisenheimer Bewässerungssteuerung oder N-Expert zur Verfügung.

Eine Evaluierung der Gewässerschutzberatung in Hessen im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Berthold 2017) hat gezeigt, dass „trotz aller Erfolge des kooperativen Trinkwasserschutzes die Ziele der EG-WRRL mit freiwilligen Maßnahmen bei Weitem nicht zu erreichen sind.“ Es wird daher postuliert, dass „der entsprechende Beitrag zur Reduzierung der Stickstoffüberschüsse über die Novellierung der Düngeverordnung (DüV) geleistet werden muss.“ (Berthold 2017)

6.5. Bewässerungsverfahren und Methoden zur Bewässerungssteuerung

Die Bewässerung ist eines der teuersten, aber ein unverzichtbares Betriebsmittel im Gemüsebau, um ausreichend Erträge sowie geforderte Qualitäten sicherstellen zu können. Die Klimasimulationen für das Hessische Ried zeigen, dass zukünftig mit einer Niederschlagsumverteilung zu rechnen ist. Bezieht sich der Kulturzeitraum für den Anbau von Gemüse auf den Zeitraum von März bis Oktober, so ist die Niederschlagsverfügbarkeit in dieser Zeit für das Pflanzenwachstum limitiert. Im Rahmen des Klimawandels wird die Bewässerung diesbezüglich an Bedeutung gewinnen, um im Hessischen Ried die zukünftig nicht mehr ausreichenden Niederschläge in der Vegetationszeit zu kompensieren, die Erträge auf einem hohen Niveau zu stabilisieren und gute bzw. mitunter auch bessere Qualitäten zu gewährleisten.

Um zukünftig Konflikte mit der Wasserwirtschaft bei einer Ausdehnung der bewässerten Fläche zu vermeiden, muss das Zusatzwasser möglichst effizient eingesetzt werden. Weiterhin verbraucht die Bereitstellung des Wassers Energie, was dazu führt, dass bei steigenden Energiepreisen auch die Kosten pro m³ Wasser entsprechend zunehmen, weshalb der Wassereffizienz Beachtung geschenkt werden sollte. Auch muss die Bewässerung die Voraussetzung erfüllen, Wasserverluste in Form von Verdunstung, Abdrift, Oberflächenabfluss und Versickerung zu minimieren. Denn damit hängt direkt der ökonomische Erfolg der Bewässerung zusammen. Eine Bewässerung ist nämlich nur dann ökonomisch sinnvoll, wenn der durch Bewässerung erzielte Mehrerlös aufgrund von Ertrags- und/oder Qualitätssteigerung die Kosten für die Zusatzbewässerung übersteigt. Aus diesen Gründen und im Sinne eines nachhaltigen Einsatzes der Ressource Wasser spielt die Bewässerungssteuerung sowie die Auswahl der Bewässerungstechnik eine wichtige Rolle.

Die Bewässerung sollte durch eine gezielte Steuerung, die an den Bedarf der Pflanzen und die Bodenverhältnisse angepasst ist, erfolgen, da somit die Bodenfeuchte innerhalb eines bestimmten Bereiches gehalten werden kann, der ideal für das Pflanzenwachstum und die Aufnahme von Nährstoffen ist. Grundsätzlich gilt, dass eine hohe Bewässerungseffizienz nur erreichbar ist, wenn das Zusatzwasser während der gesamten Kulturzeit bedarfsgerecht eingesetzt wird. Umso berechnungswürdiger eine Kultur, das heißt umso mehr Ertrag durch eine Berechnung erzielt werden kann, umso wich-

tiger ist die bedarfsgerechte Bewässerungssteuerung. Besonders Gemüse gehört zu den Profiteuren. Eine einfache Lösung stellt hierbei die Geisenheimer Bewässerungssteuerung dar. Sie ermöglicht die Steuerung der Zusatzwassergaben durch Rechenmodelle auf Grundlage der klimatischen Wasserbilanz und kulturspezifischen Wasserverbräuchen.

Neben der Steuerung stellt auch die gewählte Bewässerungstechnik einen wichtigen Faktor dar. Neben dem Kapitalbedarf für die Technik spielt auch der Arbeitszeitbedarf eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der Bewässerungstechnik. Allgemein kommen im Gemüseanbau vorrangig Tropfbewässerung und Rohrberegnung zum Einsatz, wobei die Bewässerung im Ried vorwiegend über die Rohrberegnung bewerkstelligt wird. Beide Techniken haben den Vorteil, dass sie nach dem Aufbau Arbeitszeit einsparen. Ein wesentlicher Vorteil der Rohrberegnung ist, dass mit ihr eine Frostschutzberegnung durchgeführt werden kann. Allgemeingültig lässt sich sagen, dass die Tropfbewässerung kostenintensiver ist als die Verwendung einer Rohrberegnung (vgl. Kapitel 4.5.2). Im Schnitt sind die Kosten für eine Bewässerung der Kulturen bei gleicher Bewässerungsmenge mit der Tropfbewässerung um 87% höher als bei Einsatz einer Rohrberegnung (siehe Tabelle A 8 und A 9). Dennoch bietet die Tropfbewässerung einige Vorteile gegenüber der Rohrberegnung. Während bei letzterer mit Interzeptionsverlusten gerechnet werden muss, tendieren die Wasserverluste durch Verdunstung oder Versickerung bei richtig eingesetzter Tropfbewässerung gen Null. Dieses Bewässerungssystem sichert eine kontinuierliche Mengenabgabe, sodass der kulturspezifische Bedarf exakt eingestellt werden kann. Ebenso ermöglicht der Einsatz einer Tropfbewässerung eine gezielte und dosierte Ausbringung von Düngemitteln, die meist mit einer Verminderung der Nährstoffverluste einhergeht.

Neben der Bewässerungstechnik, sollte auch die Bewässerungssteuerung zukünftig verstärkt in den Fokus rücken. In Zukunft wird die Herausforderung also darin bestehen, eine zeitlich und mengenmäßig an den Bedarf der Kultur angepasste, hohe Präzision der Bewässerungsgabe zu erzielen und dabei möglichst ressourcen- und energieeffizient zu sein. Dabei sind Zeitpunkt, Menge, Intensität und Beregnungsart im Zusammenspiel mit dem jeweiligen Boden und der angebauten Kultur entscheidende Kriterien. Übermäßige Bewässerung führt aber zu erhöhtem Sickerwasserabfluss und erhöhter Nitratauswaschung; sie ist somit ineffizient und umweltbelastend. Gegenwärtig ist hier die Steuerung auf der Basis von Bodenfeuchtesensoren oder nach klimatischer Wasserbilanz (z. B. Geisenheimer Steuerung) zu empfehlen.

6.6. Mögliche Auswirkungen auf den zukünftigen Gemüseanbau

In Hessen macht die landwirtschaftlich genutzte Fläche aktuell einen Anteil von 37% aus, wobei für den Gemüseanbau im Freiland 6877 ha (Stand 2015) anfallen. Im Zeitraum von 2004 bis 2014 stieg die Anbaufläche weiter an, zwischenzeitlich sogar mit Spitzen bei über 7000 ha (Tabelle A 1). Bei Betrachtung der Ertragszahlen (Tabelle A 2) wird deutlich, dass für die Erträge von Zwiebel, Buschbohne und Spargel ein Anstieg in den letzten Jahren zu verzeichnen ist. Bei durchschnittlich gleichbleibender Anbaufläche spricht dies bereits für eine Intensivierung des Anbaus, die sich zukünftig durchaus fortsetzen könnte.

Im Hessischen Ried mit überwiegend Gemüseanbau ist sogar schon heutzutage die Möglichkeit zur Bewässerung unter den klimatischen Bedingungen einer der wichtigsten Aspekte. Im Zusammenhang mit einer klimatisch bedingten, zunehmenden Wasserlimitierung kann damit gerechnet werden, dass ohne die Ausweitung der Bewässerung oder den Anbau von Kulturen mit geringerem Wasserbedarf, Ernteausfälle häufiger vorkommen könnten als dies gegenwärtig der Fall wäre. Andere Studien prognostizieren gesteigerte Ertragseinbußen und abnehmende Ertragssicherheit als Resultat des Klimawandels ohne eine Zusatzbewässerung (Gerstengabe 2003, Wechsung 2008).

Weiterhin ist fraglich, inwieweit die Bewässerung im Hessischen Ried zukünftig ausgeweitet werden kann. Ausgehend von den Zahlen aus dem Jahr 2009 (s. Kapitel 4.1.4) wurden die Möglichkeiten zur

Bewässerung nicht voll ausgeschöpft. Tatsächlich wurden im Schnitt nur um die 50% der potentiell beregnungsfähigen Flächen bewässert.

Ausgehend vom simulierten Trend zu trockeneren Verhältnissen müssen im Hessischen Ried zukünftig vermehrt effiziente Bewässerungstechnik sowie wassersparende Kulturmaßnahmen (Bodenbearbeitung, Bestellung und Pflege) zum Einsatz kommen. Des Weiteren simulieren die regionalen Klimamodelle eine Verlängerung der Vegetationsperiode, sprich einen früheren Beginn sowie ein verspätetes Ende, für das Hessische Ried. Die Erweiterung des möglichen Anpassungszeitraumes ist für den Gemüseanbau in erster Linie positiv, da weitere Sätze pro Jahr angebaut werden könnten und sich somit eine Ertragssteigerung erzielen lässt. Die Unsicherheiten hinsichtlich möglicher Früh- und Spätfröste dezimieren diese Vorteile jedoch wieder. Der simulierte Klimawandel führt im Hessischen Ried zu einem zukünftig erhöhten Bewässerungsbedarf. In Kombination mit einer flächenbezogenen Ausweitung und Intensivierung des Gemüseanbaus würde dieser bereits erhöhte Bedarf weiterhin ansteigen.

Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die zukünftige zeitliche Verschiebung der thermischen Vegetationsperioden eine zeitliche Anpassung des Anbauzeitraumes von Gemüse ermöglichen und dadurch Zusatzwasser zukünftig eingespart werden kann. Dennoch führen die zukünftigen klimatischen Veränderungen unabhängig davon dazu, dass die Zusatzwasserbedarfe der untersuchten Kulturen bis 2100 deutlich ansteigen und die zeitliche Adaption nicht ausreichend ist, um das während der Vegetationszeit auftretende Defizit gänzlich auszugleichen.

Dabei gilt zu berücksichtigen, dass der Einfluss des Klimawandels auf den zukünftigen kulturspezifischen Zusatzwasserbedarf nur für die Kulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel untersucht wurde. Des Weiteren beziehen sich die Ergebnisse auf lediglich einen Anbausatz pro Jahr für jede Kultur. Im Gegensatz dazu stellt es sich in der Praxis jedoch so dar, dass die Betriebe ein großes Spektrum verschiedener Gemüsekulturen zum Teil in mehreren Sätzen pro Jahr anbauen. Dies in Kombination mit einem klimatisch bedingten zukünftigen Anstieg des Zusatzwasserbedarfs aufgrund einer Entwicklung hin zu trockeneren Verhältnissen stellt den Gemüsebau hinsichtlich einer Gewährleistung der Bewässerung vor große Probleme.

Berücksichtigt man zudem den Aspekt, dass mit einem erhöhten Bewässerungsbedarf auch die Kosten weiter steigen, ist fraglich, ob und wie die Betriebe das zukünftig leisten können. Dabei sind weniger die Kosten für das Wasser selbst, sondern vielmehr für den Betrieb der eingesetzten Bewässerungstechnik, also Material- und Lohnkosten ausschlaggebend. Aus heutiger Sicht sind die Betriebe an ihren Leistungsgrenzen angelangt. Ein zukünftig erhöhter Bedarf an Materialkosten sowie an Arbeitskräften und damit verbunden erhöhte Lohnkosten werden für viele Betriebe schwer umzusetzen sein. Es wird also darauf hinauslaufen, dass Investitionen in ressourcensparende und automatisierbare Bewässerungssysteme getätigt werden müssen, um den Mehrbedarf zukünftig decken zu können und dabei gleichzeitig einen Anstieg der Produktionskosten so gering wie möglich zu halten.

Wie sich der Gemüseanbau jedoch explizit im Rahmen des Klimawandels zukünftig entwickelt, lässt sich nur schwer formulieren, da dies von vielen weiteren Faktoren abhängt. Zum einen kann nicht genau abgeschätzt werden, inwieweit sich die Technik weiterentwickelt. Des Weiteren wird der zukünftige Anbau von Gemüse zum einen stark von der Nachfrage der Verbraucher und zum anderen von der züchterischen Entwicklung abhängen. Der Trend wird höchstwahrscheinlich dahingehen, dass der Fokus langfristig verstärkt auf Sorten mit den Merkmalen Hitze- bzw. Trockentoleranz sowie geringerem kulturspezifischen Wasserbedarf liegen wird, um insbesondere Ertragseinbußen auf ein Minimum zu reduzieren.

Dennoch muss der Gemüseanbau seine Bewirtschaftungs- und Bewässerungspraxis an die zukünftigen klimatischen Bedingungen anpassen, um Ertragsminderungen und erhöhte Ertragsvariabilitäten

sowie steigende Bewässerungskosten zu vermeiden (Fricke 2008). Die Ressource Wasser wird im Zuge des Klimawandels zunehmend als limitierender Faktor betrachtet werden müssen. Aus diesen Gründen ist die Gewährleistung eines exakten und effizienten Wassereinsatzes bzw. einer Bewässerungssteuerung von großem, wissenschaftlichem und praxisbezogenem Interesse.

7. Ausblick und Forschungsbedarf

Diese Studie zeigt, dass eine Beurteilung der klimawandelbedingten Auswirkungen auf den Gemüsebau im Hessischen Ried eine Vielzahl von Kenntnissen über klimatische Standortbedingungen, Anbauverfahren, Kulturauswahl, Bewässerungstechnik und dergleichen voraussetzt. Ebenso wird deutlich wie unterschiedlich der Effekt des Klimawandels auf einzelne gemüsebauliche Aspekte ausfällt. Selbst die vier betrachteten Modellkombinationen kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der projizierten Niederschläge und den daraus resultierenden Wasserhaushaltsgrößen in Verbindung mit den projizierten Temperaturänderungen. Diese große Bandbreite der Ergebnisse sowie die damit verbundenen Unsicherheiten treten bei allen Arbeiten zum Thema Klimawandel auf. Es steht sicherlich nicht zur Debatte, dass ein umfangreiches Spektrum angewandter Klimamodelle sinnvoll ist, um mögliche klimawandelbedingten Auswirkungen mit regionalem Bezug verlässlicher erfassen und interpretieren zu können. Die Bestrebungen zukünftig auf ein größeres Ensemble von Modellen bzw. Modellkombinationen zurückzugreifen, ist daher mehr als wünschenswert. Hier gilt es Aufwand und Aussagekraft gegeneinander abzuwägen

In diesem Projekt lag der Fokus verstärkt auf den Faktoren, die den Wasserhaushalt beeinflussen, also Niederschlag sowie Temperatur und Evapotranspiration. Ein weiterer wichtiger Klimafaktor ist das CO₂, welches in dieser Studie indirekt durch das Szenario A1B mit in die Analysen einfließt. In Bezug auf den starken Klimateffekt, der diesem Klimafaktor zugeschrieben wird, besteht gerade für gemüsebauliche Fragestellungen aber noch weiterer Forschungs- und Auswertungsbedarf. In der Literatur finden sich viele Hinweise auf die Wirkungsweise des CO₂ bei Gemüse auf unterschiedlichste Schwerpunkte wie bspw. Photosynthese, stomatäre Leitfähigkeit und Wassernutzungseffizienz, Transpiration, sowie Pflanzenwachstum und Biomasseproduktion, aber auch auf die Qualität der Inhaltsstoffe (Besford et al. 1990, Brecht et al. 2002, Fricks et al. 2005, Kläring et al. 2007, Tuba et al. 1994, Li et al. 2015).

Bisher gibt es kaum Freilandversuche, die sich mit der Interaktion von CO₂ und Wasserstress bei Gemüse befassen. Am Institut für Gemüsebau an der Hochschule Geisenheim wird sich im Rahmen eines FACE Projektes mit der Fragestellung, inwiefern sich der CO₂ Effekt und ein reduziertes Wasserangebot auf die Gemüseproduktion auswirken, näher beschäftigt.

Die phänologische Entwicklung der Kulturen unter zukünftig steigenden Temperaturen wurde mit Hilfe von Temperatursummen ermittelt, da die Temperatur einen der Hauptwachstumsfaktoren für Pflanzen darstellt. Um jedoch die Möglichkeiten eines an den Klimawandel angepassten Anbauzeitraumes konkret abschätzen zu können, ist es sinnvoll, weitere Wachstumsbeeinflussende Parameter in die Analysen zu integrieren. Einer wäre der Faktor Licht sprich die Globalstrahlung, denn es muss auch berücksichtigt werden, dass die Pflanzen zum Wachstum bzw. für bestimmte Wachstumsstadien gewisse Lichtverhältnisse benötigen. Es gilt also zusätzlich zu prüfen, ob neben der Temperatursumme auch die Lichtverhältnisse gegeben sind, damit die jeweiligen Entwicklungsstadien eintreten können.

Um eine komplexe und konkrete Vorstellung davon erhalten zu können, wie und in welchem Umfang sich der Klimawandel auf die gemüsebaulichen Schwerpunkte Wasserbedarf und Stickstoffdüngung in Einheit mit einer veränderten Pflanzenentwicklung auswirkt, müsste aufgrund der Vielfältigkeit der Gemüsesorten das Spektrum der betrachteten Kulturen ausgeweitet werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse eins zu eins auf andere Kulturen übertragbar sind.

Die Auswertung der regionalen und zeitlichen Variabilität der klimatischen Faktoren, die die Wasserverfügbarkeit und die Stickstoffdynamik beeinflussen, weist eine große Bandbreite auf und bietet viel Raum für die Interpretation. Dennoch sind Trends feststellbar, welche Einschränkungen sich zukünftig bzgl. der Wasserverfügbarkeit einstellen, inwiefern sich der Wasserbedarf der Kulturen entwickeln kann und welche Möglichkeiten der Anpassung sich durch eine Veränderung der Vegetationsperiode ergeben können.

8. Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan

Hinsichtlich des ursprünglichen Arbeitsplans wurde von der vorab angedachten methodischen Vorgehensweise, die zukünftige Veränderung der Phänologie auf Grundlage einer prozentual beschleunigten Entwicklung der einzelnen morphologischen Stadien zu berechnen, abgewichen. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen im Verlauf der Datenerhebung und -analyse sowie im Austausch mit Herrn Prof. Grünhage hat sich herausgestellt, dass sich die potentiellen Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und die damit angenommenen Veränderungen methodisch sinnvollerweise nicht auf Annahmen stützen sollten, die von einer vorab fest definierten Entwicklungszeit sowie -stadien ausgehen. Dementsprechend erschien es auch nicht weiter sinnvoll, nur eine prozentual veränderte, sprich beschleunigte Kulturentwicklung anzunehmen. Daher wurde die Klimawandelbedingte Veränderung hinsichtlich der pflanzlichen Entwicklung methodisch auf Grundlage eines Temperatursummen-Modells analysiert. Dies hat den Vorteil, dass die simulierte Pflanzenentwicklung stark mit der simulierten Veränderung der klimatischen Parameter der Klimamodelle verknüpft ist. Daraus ergibt sich wiederum eine wesentlich weniger starre Betrachtung der pflanzlichen Entwicklung unter Annahme eines stattfindenden Klimawandels.

Ebenso wurden die Berechnungen der Veränderung des Wasserverbrauchs bei veränderten Eintrittsterminen der Entwicklungsstadien nur für die drei Hauptkulturen Zwiebel, Buschbohne und Spargel durchgeführt. Ursprünglich war angedacht, diesen auch für Blumenkohl und Möhre abzuschätzen. Basierend auf den Einschränkungen hinsichtlich der dafür benötigten Datengrundlage und dem damit verbundenen Umfang der Datenauswertung wurde darauf zu Gunsten einer komplexen und abgesicherten Auswertung der drei Hauptkulturen verzichtet.

9. Literatur

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. 300pp IN: Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.

Anandhi, A. (2016): Growing degree days – Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas. *Ecological Indicators* Vol. 61, 149-158.

Armbruster, M.; Heger, A.; Laun, N. und Wiesler, F. (2013): Integriertes Stickstoff-Managementsystem als Maßnahme zur Verbesserung der N-Effizienz in der Pflanzenproduktion – dargestellt am Beispiel Gemüsebau. *VDLUFA-Schriftenreihe Band 69/2013*, 182-191.

Armbruster, M.; Laun, N. und Wiesler, F. (2010): Modellrechnungen zur Extrapolation des Einflusses von Maßnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung in das Grundwasser im Gemüsebau der Vorderpfalz. *VDLUFA-Schriftenreihe Band 66/2010*.

ATV-DVWK-M 504 (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.

Berthold, G. (2017): Evaluierung der Gewässerschutzberatung in Hessen im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie sowie Kernaussagen für den Bereich Grundwasser. Umsetzung der EG-WRRL in Hessen. Bewirtschaftungs- und Maßnahmenplan 2015 - 2021. Vortrag 24. Mai 2017.

Berthold, G. (2010): Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement. IN: BMBF-Fördermaßnahme Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen, Teilaspekt B: Anpassung an Klimatrends und Extremwetter (Abschlussbericht).

Berthold, G. (2008): Sicherstellung der landwirtschaftlichen Produktion mit Zusatzwasserbedarf bei veränderten klimatischen Bedingungen – Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement sowie Anbauempfehlungen für die landwirtschaftliche Produktion im Hessischen Ried. Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012 II plus (Abschlussbericht).

Berthold, G., Hergesell M. 2005. Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser). IN: Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012. Projektbaustein II: Klimawandel und seine Folgen. Abschlussbericht. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Besford, R.T. (1990): The Greenhouse Effect: Acclimation of Tomato Plants Growing in High CO₂, Relative Changes in Calvin Cycle Enzymes. *Journal of Plant Physiology* Vol. 136, 458-463.

Cao, Y. et al. (2014): Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice–wheat rotation system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* Vol. 195, 61-67.

Carter, T.R. (2008): Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *Agricultural Food Science* Vol. 7 (2), 161-179.

Chen, X. (1994): Untersuchungen zur zeitlich-räumlichen Ähnlichkeit von phänologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluss geoökologischer Faktoren auf die phänologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. *Berichte des deutschen Wetterdienstes*, Nr. 189, Offenbach am Main.

- Chmielewski, F.-M., Müller, A. und Küchler, W. (2004): Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. Eigenverlag HU Berlin, 5-14.
- Chmielewski, F. M. (2013): Klimawandel in Hessen - Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau. INKLIM-A Abschlussbericht
- Chmielewski, F. M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, W. Endlicher, F.M. Gerstengarbe (Hrsg.).
- Ciais, P. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529-533.
- Dakhlalla, A.O. et al. (2016): Evaluating the impacts of crop rotations on groundwater storage and recharge in an agricultural watershed. *Agricultural Water Management* Vol 163, 332-343.
- Demurtas, C.E. et al. (2016): Replacing organic with mineral N fertilization does not reduce nitrate leaching in double crop forage systems under Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* Vol. 219, 83-92.
- Enke, W.; Kreienkamp, F.; Spekat, A. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau.
- Erban, L.E., Gorelick, S.M. (2016): Closing the irrigation deficit in Cambodia: Implications for trans-boundary impacts on groundwater and Mekong River flow. *J. Hydrol.* 535, 85-92.
- Feller, C. (2012a): Dormanzverhalten von Spargelsorten; Erdpreßtopf-Pflanzverfahren. Vortrag anlässlich des 70. AK-Spargel 2012 in Geisenheim. Hortigate (23.08.16).
- Fricke, E. (2008): Mit der Beregnung das Ertragsrisiko senken. *Top agrar* Heft 12, 100-103.
- Fricke, E. (2009): Stoffverlagerungen durch Bewässerung in Niedersachsen. *Landbauforschung, Sonderheft* 328.
- Fricks, A.T. et al. (2006): Evaluation of radish (*Raphanus sativus* L.) peroxidase activity after high-pressure treatment with carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids* Vol. 38, 347-353.
- Fuhrer, J. (2003): Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97, 1-20.
- Gerstengarbe, F.W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft, sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report 83, Potsdam, 77 S.
- Grogan, D.S. et al. (2015): Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China. *Science of The Total Environment* Vol. 511, 161-175.

Grünhage, L., Streitfert, A., Jäger, H.-J. (2005): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. Abschlussbericht INKLIM 2012, Baustein II: Klimafolgen. Veröffentlichung Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Hansen, E.M. & Eriksen, J. (2016): Nitrate leaching in maize after cultivation of differently managed grass-clover leys on coarse sand in Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment* Vol. 216, 309-313.

Hartmann, H. D., Pfülb, E., Zengerle, K. H. (2000): Wasserverbrauch und Bewässerung von Gemüse. Geisenheimer Berichte, Band 44.

Hatfield, J.L. and Prueger, J.H. (2015): Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes* Vol. 10, 4-10.

Heidt, L. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. *GeoBerichte* 13. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (Hrsg.)

Heissner, A. Schmidt, S, Schonhof, I, Feller, C and Schreiner, M. (2006): Spear yield and quality of white asparagus as affected by soil temperature. *European Journal of Agronomy*. Vol. 25, (4), 336-344.

Hennings, Hans-H. und Bernhard Scheffer (2000): Zum Nitrataustrag ins Grundwasser - Stand der Erkenntnisse. In: *Wasserwirtschaft* 90. Jg., S. 348-355.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2010): Klimawandel und seine Folgen in Hessen – Forschungsergebnisse von INKLIM 2012 II plus

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008a): Großmaßstäbige Bodeninformationen für Hessen und Rheinland-Pfalz. Auswertung von Bodenschätzungsdaten zur Ableitung von Bodenfunktionen und -eigenschaften.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008b): Klima-Biomonitoring: Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. Veröffentlichung Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008c): Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen: Aufstellung von Maßnahmenprogrammen im Sinne des Artikels 11 der europäischen Wasserrahmenrichtlinie Bereich Grundwasser - diffuse N-Einträge. Maßnahmen zur Verminderung der diffusen Stickstoffeinträge in das Grundwasser - Räumliche Zuordnung. Veröffentlichung Schnittstelle Boden – Ingenieurbüro für Boden- und Grundwasserschutz

Hunink, J.E., Contreras, S., Soto-García, M., Martin-Gorriz, B., Martinez-Álvarez, V., Baille, A. (2015): Estimating groundwater use patterns of perennial and seasonal crops in a Mediterranean irrigation scheme, using remote sensing. *Agric. Water Manag.* 162, 47-56.

Model and Growth Stage Based Variability of the Irrigation Demand of Onion Crops with Predicted Climate Change (PDF Download Available). Available from: https://www.researchgate.net/publication/319636826_Model_and_Growth_Stage_Based_Variability_of_the_Irrigation_Demand_of_Onion_Crops_with_Predicted_Climate_Change [accessed Feb 21 2018].

IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jabloun, M. et al. (2015): Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* Vol. 62, 55-64.

Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorological Atmospheric Physics* 77, 61-73.

Jacob, H. B., Koch, M. (2005): Folgen, Maßnahmen und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen. Abschlussbericht im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen 2012 Baustein II

Jacob, D. et al. (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *PRUDENCE Special Issue. Climatic Change*. Vol. 81.

Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. *Climate Change /08*. Dessau.

Jamali, H. et al. (2015): Reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching losses from irrigated arable cropping in Australia through optimized irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 208, 32-39.

Kanthle, A.K. et al. (2016): Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India. *Soil and Tillage Research* Vol. 157, 65-72.

Kirby, J.M.; Mainuddin, M.; Mpelasoka, F.; Ahmad, M.D.; Palash, W.; Quadir, M.E.; Shah-Newaz, S.M.; Hossain, M.M. The impact of climate change on regional water balances in Bangladesh. *Clim. Chang.* 2016, 135, 481–491.

Model and Growth Stage Based Variability of the Irrigation Demand of Onion Crops with Predicted Climate Change (PDF Download Available). Available from: https://www.researchgate.net/publication/319636826_Model_and_Growth_Stage_Based_Variability_of_the_Irrigation_Demand_of_Onion_Crops_with_Predicted_Climate_Change [accessed Feb 21 2018].

Kläring, H.-P. et al. (2007): Model-based control of CO₂ concentration in greenhouses at ambient level increases cucumber yield. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 143, 208-216.

Kleber, J. (2014): Bewässerungssteuerung“. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).

KLIWA (Hrsg.) (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. *KLIWA-Berichte*, Heft 12.

Koizumi, T., Yamazaki, H. Yamato, Y. Hamano, M., Takahashi, K., Miura, H. (2002). Effects of Cultivar, Extent of Cumulative Chilling Exposure, Age of Rootstock and Sex on Growth of Spear in Asparagus Forcing Culture. *Horticultural Research (Japan)* Vol. 1, (3) 205-208.

Kreienkamp, F., Spekat, A. und Enke, W. (2010): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Bericht der Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH

KTBL (2012): Management der Ressource Wasser. KTBL-Schrift No. 492, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.

KTBL (2013): Freilandbewässerung. Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.

Kunrath, T.R. et al. (2015): How much do sod-based rotations reduce nitrate leaching in a cereal cropping system? *Agricultural Water Management* Vol. 150, 46-56.

Kunzelmann, G. (1998): Möglichkeiten zur effizienten Bewässerung und Bewässerungssteuerung bei ausgewählten Freilandgemüsearten sowie bei Zuckerrüben und Mais. *Geisenheimer Berichte*, Band 38 (1999)

LeCompte, S.B., Blumenfeld, D., (1958). Degree-days used to predict time of asparagus heavy cut. *N.J.Agr.* 40, 12-13.

Leimer, S. et al. (2015): Time matters for plant diversity effects on nitrate leaching from temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* Vol. 211, 155-163.

Li, B. et al. (2015): Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmospheric Environment* Vol. 100, 10-19.

Linderholm, H.W. (2006): Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 137, 1-14.

Menzel, A. und Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659.

Michel, R. und Sourell, H. (2014): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Agrimedia, ERLING Verlag.

Min, J., Zhang, H. and Shi, W. (2012): Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production. *Agricultural Water Management* Vol. 111, 53-59.

Motsa, M.M. et al. (2015): Effect of light and temperature on seed germination of selected African leafy vegetables. *South African Journal of Botany* Vol. 99, 29-35.

Nds. MU (2009): *Der Klimawandel als Herausforderung für Staat und Gesellschaft. Strukturpapier einer Anpassungsstrategie*. Hannover.

Paschold, P.-J. und J. Kleber (2009). „Reduziertes Wasserangebot vermindert Ertrag von Zwiebeln“. In: *Versuche im deutschen Gartenbau - Gemüsebau* 21, S. 139. url: <http://www.hortigate.de/bericht?nr=40054>

Paschold, P. J. (2010): *Bewässerung im Gartenbau*. Ulmer Verlag, Stuttgart.

Paschold, P.J. et al. (2011): *Geisenheimer Bewässerungssteuerung und FAO Grasverdunstung. DGG-Proceedings*, Vol. 1, No. 5, 1-5.

- Pfeiffer, L. and Cynthia Lin, C.-Y. (2014): Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management* Vol. 67, 189-208.
- R Core Team (2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Regierungspräsidium Darmstadt (Hrsg.) (2009): Landwirtschaftliche Bewässerung.
- Robb, A.R. (1984) Physiology of asparagus (*Asparagus officinalis*) as related to the production of the crop. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 12, 251-260.
- Roeckner, E. et al., (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. MPI-Report No. 349
- Roeckner, E. et al., (2004): The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part II: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution. MPI-Report No. 354
- Schmidt, N.; Zinkernagel, J. (2012): Climate Impact Research - Climate Change Induced Changes of Water Demand and Leaching of Nitrate for Vegetable Production in Hessian Reed. SHE 2012 - 2nd Symposium on Horticulture in Europe, Angers, France.
- Schmidt, N., Zinkernagel, J., Weinheimer, S. (2013). Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs für die Gemüseproduktion in Rheinland-Pfalz unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Abschlussbericht. FAWF, Rheinland-Pfalz.
- Schnelle, F. (1955): Pflanzen-Phänologie. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Porting K.-G., Leipzig.
- Schultz, H. R., Hofmann, M. (2008): Einfluss der Klimaentwicklung auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten - Möglichkeiten der Modellierung von Steillagenregionen. Abschlussbericht zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (INKLIM 2012 II plus) des Fachgebiets Weinbau der Hochschule Geisenheim.
- Schwartz, M.D., Ahas, R., Aasa, A. (2006): Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* Vol 12 (2), 343-351.
- Shen, M., Tang, Y., Chen, J., Yang, W. (2012): Specification of thermal growing season in temperate China from 1960 to 2009. *Climate Change* Vol. 114 (3-4), 783-798.
- Sparks, T.H., Aasa, A., Huber, K., Wadsworth, R. (2009): Changes and patterns in biologically relevant temperatures in Europe 1941 - 2000. *Climate Research* Vol. 39 (3), 191-207.
- Sun, H. et al. (2015): Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production – A case study in the North China Plain. *European Journal of Agronomy* Vol. 70, 48-56.
- Tuba, Z., Szente, K., Koch, J. (1994): Response of Photosynthesis, Stomatal Conductance, Water Use Efficiency and Production to Long-Term Elevated CO₂ in Winter Wheat. *Plant Physiology* Vol. 144, 661-668.
- Umweltbundesamt (2007): Regional climate changes: Recent findings. WETTREG: A statistical regionalization model. Background Paper (Dessau 2007)

Walther, G. et al. (2002): Ecological responses to recent climate change. Nature Vol. 416 (6879), 389-398.

Wasserverband Hessisches Ried, <http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/html/19.html>, Stand September 2011.

Wechsung, F.; Gerstengarbe, F.-W.; Lasch, P. & Lüttger, A. (2008): Die Ertragsfähigkeit Ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. Studie im Auftrag der Bodenverwertungs- und -verwaltungs- GmbH (BVVG).

Wonneberg, C. et al. (2004): Gemüseanbau. Ulmer Verlag

10. Anhang

Tabelle A 1: Anbaufläche (in ha) der Gemüsekulturen Zwiebel, Spargel und Buschbohne im Freiland sowie der Anteil (in%) an der Gesamtfläche des Freilandgemüseanbaus der Jahre 2004 bis 2014 basierend auf der Agrarstatistik des Landes Hessen

Gemüse	Fläche in ha											Anteil der Kultur in % an der Gesamtfläche des Freilandgemüseanbaus										
	2004	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	MW	2004	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	MW
Zwiebel	1112	1041	1284	1219	1154	1276	1413	1316	1233	1367	1241	17	16	18	16	16	18	20	18	18	20	18
Spargel	2219	2328	2256	2158	2150	2180	2187	2302	2234	2215	2223	34	35	32	29	30	32	31	32	33	32	32
Buschbohne	466	494	509	557	481	519	518	518	573	540	517	7	7	7	8	7	8	7	7	9	8	7
Gemüse im Freiland (total)												Summe der Anbaufläche von Zwiebel, Spargel und Buschbohne										
	6580 6696 7011 7397 7104 6908 7032 7124 6681 6885 6942											im Mittel: 3981 ha										
												daraus resultierender Anteil in Prozent an der Gesamtfläche										
												im Mittel: 57 %										
LF Hessen *	752615 771810 773584 774737 777822 766437 768100 763100 771900 768000 768811											Anteil der Fläche für Freilandgemüseanbau in % an der gesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche Hessen										
												0,87 0,87 0,91 0,95 0,91 0,90 0,92 0,93 0,87 0,90 0,90										
*) LF Hessen = landwirtschaftlich genutzte Fläche des Landes Hessen insgesamt											Landwirtschaftlich genutzte Fläche des Landes Hessen											
											im Mittel: 768.811 ha											
											daraus resultierender Anteil in Prozent des Freilandgemüseanbaus											
											an der gesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche: 0,9 %											

Tabelle A 2: Erhebung des Ertrags (in dt je ha) sowie des Gesamtertrages (in dt) der Gemüsekulturen Zwiebel, Spargel und Buschbohne der Jahre 2004 bis 2014 basierend auf der Agrarstatistik des Landes Hessen (Hessisches Statistisches Landesamt, Stand 2016)

Jahr	Gemüse					
	Zwiebel		Spargel		Buschbohne	
	Ertrag [dt/ha]	Gesamtertrag [dt]	Ertrag [dt/ha]	Gesamtertrag [dt]	Ertrag [dt/ha]	Gesamtertrag [dt]
2004	449,2	555.011	48,8	92.738	81,1	37.780
2006	442,3	567.746	48	91.668	77,1	39.202
2007	450,6	520.381	56,3	104.306	83,4	42.733
2008	492,1	555.011	50,8	92.667	80,9	45.040
2009	617	711.872	60,9	112.508	108,7	52.318
2010	486,1	611.317	58	108.058	125,3	64.962
2011	584,6	825.370	61,3	112.517	119,6	61.915
2012	532,4	700.768	52	95.511	95	49.182
2013	444,4	544.755	52,8	93.156	89,2	51.123
2014	516,5	705.854	62,8	114.992	86,3	46.610
MW	501,5	629.808,5	55,1	101.812,1	94,6	49.086,5

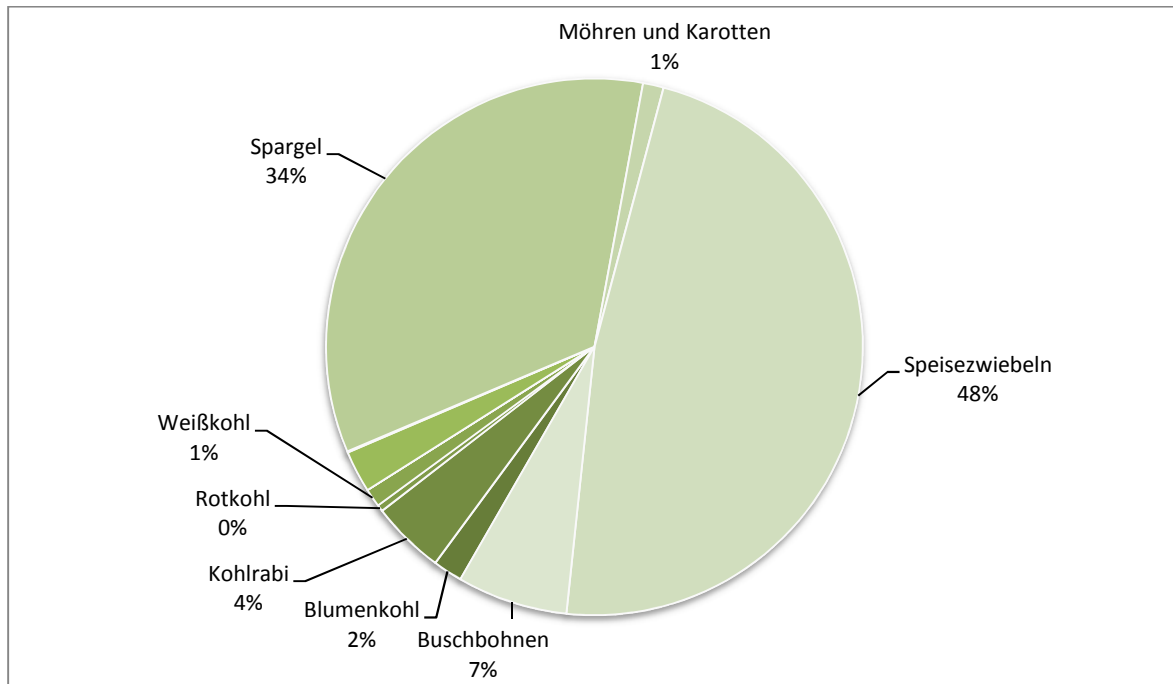


Abbildung A 1: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Groß-Gerau – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015)

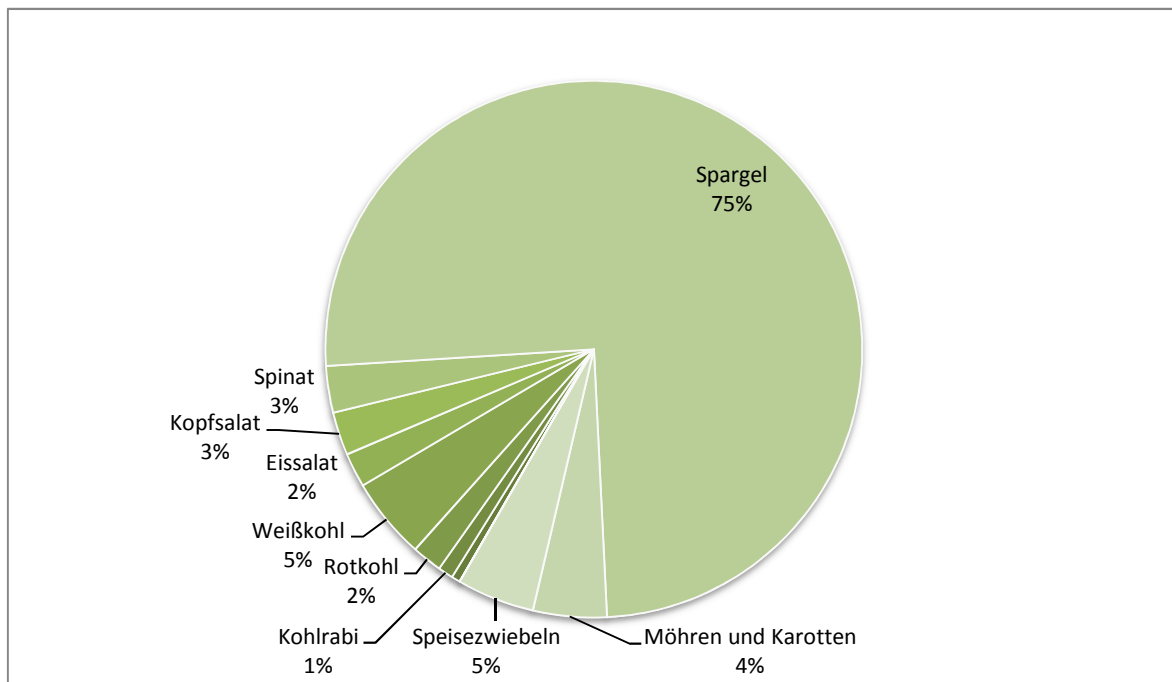


Abbildung A 2: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Darmstadt-Dieburg – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015)

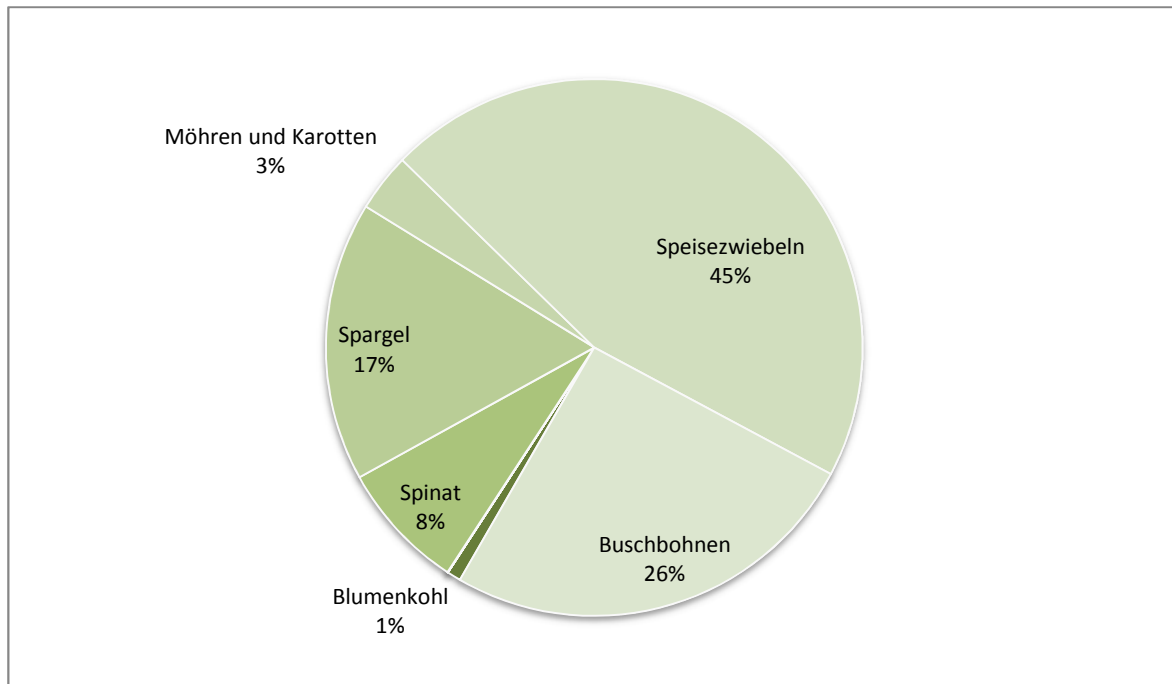


Abbildung A 3: Anbauverhältnisse verschiedener gemüsebaulicher Kulturen im Landkreis Bergstraße – prozentualer Anteil der Anbaufläche jeder einzelnen Kultur (Stand 2015)

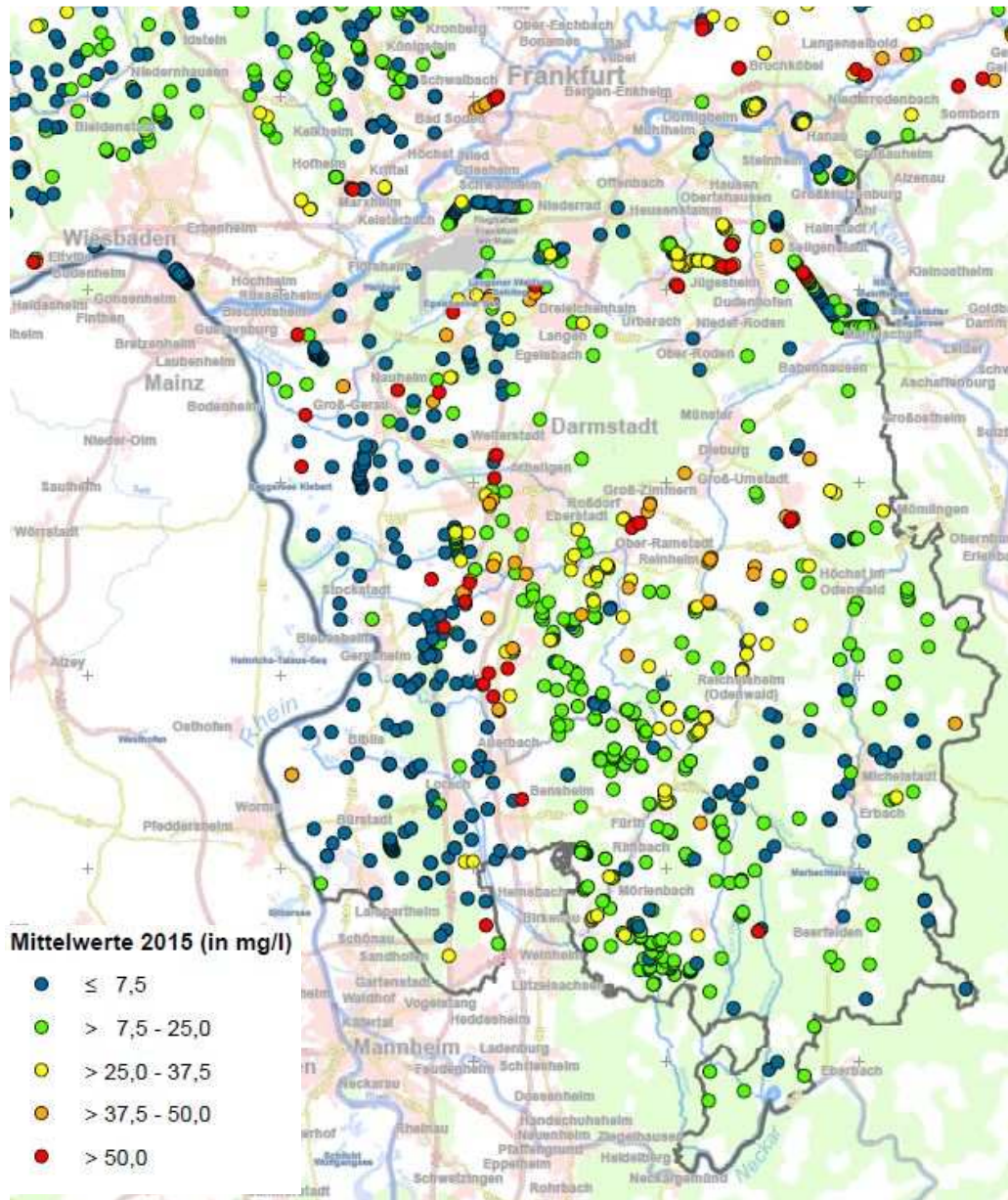


Abbildung A 4: Nitratgehalte in Hessischen Grund- und Rohwässern – Mittelwerte 2015. Kartenausschnitt für das Hessische Ried (HLNUG 2016)

Tabelle A 3: Landwirtschaftliche Betriebe mit Bewässerung auf Freilandflächen 2009 - ohne Frostschutzberechnung - nach bewässerten Flächen, nach Bewässerungsverfahren und verbrauchter Wassermenge sowie nach der Wasserherkunft für Hessen (Landwirtschaftszählung Bewässerung, Hessisches Statistisches Landesamt 2010)

Gegenstand der Nachweisung	Betriebe	Bewässerte Fläche 2009	Betriebe mit Bewässerungsverfahren		Verbrauchte Wassermenge 2009
			Beregnungsanlagen (Sprinklerbewässerung)	Tropfbewässerung (in auch Mikrosprinkler)	
	Anzahl	ha	Anzahl		1000 m ³
Betriebe mit Bewässerung 2009 insgesamt	735	15.598	657	171	14.118
Überwiegend genutzte Herkunft des Wassers:					
Aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen	173	3037	134	68	2868
Grundwasser (auch Quellwasser und Uferfiltrat)	480	11.349	455	79	10.359
Betriebseigenes Oberflächenwasser (Teiche, Staubecken)	32	46	20	19	52
Betriebsfremdes Oberflächenwasser (Flüsse, Seen, usw.)	34	753	32	5	585
Andere Herkunft (z.B. Brackwasser, aufbereitetes Wasser)	16	412	16	---	252

Tabelle A 4: Übersicht der einzelnen, den Regionalisierungsmodellen zugeordneten Gitterpunkte bzw. Stationen, die das Hessische Ried in der Fläche abbilden. Klimastationen des Modell WETTREG 2010, welche die erforderlichen Daten für die Berechnung der Evapotranspiration nach FAO 56 bereitstellen, sind markiert [*].

REMO	C-CLM ECHAM5	C-CLM HadCM3	WETTREG 2010
GP_49.55_8.15	GP_076_096	GP_092_073	Wiesbaden Biebrich
GP_49.55_8.25	GP_076_097	GP_092_074	Wiesbaden Sued *
GP_49.55_8.35	GP_077_095	GP_092_075	Hofheim Taunus Wallau
GP_49.55_8.45	GP_077_096	GP_093_073	Hochheim Main
GP_49.55_8.55	GP_077_097	GP_093_074	Hofheim Taunus
GP_49.55_8.65	GP_078_095	GP_093_075	Hattesheim Okriftel
GP_49.55_8.75	GP_078_096	GP_094_073	Frankfurt Main (Flughafen) *
GP_49.65_8.15	GP_078_097	GP_094_074	Raunheim
GP_49.65_8.25	GP_076_096	GP_094_075	Mainz Lerchenberg
GP_49.65_8.35			Langen
GP_49.65_8.45			Ober Olm
GP_49.65_8.55			Groß Gerau Wallerstadt
GP_49.65_8.65			Weiterstadt Schneppe
GP_49.65_8.75			Mettenheim
GP_49.75_8.15			Gernsheim Allmendfel *
GP_49.75_8.25			Seeheim Jugenheim
GP_49.75_8.35			Biblis

GP_49.75_8.45			Worms
GP_49.75_8.55			Lampertheim Neuschloß
GP_49.75_8.65			Hemsbach
GP_49.75_8.75			
GP_49.85_8.15			
GP_49.85_8.25			
GP_49.85_8.35			
GP_49.85_8.45			
GP_49.85_8.55			
GP_49.85_8.65			
GP_49.85_8.75			
GP_49.95_8.15			
GP_49.95_8.25			
GP_49.95_8.35			
GP_49.95_8.45			
GP_49.95_8.55			
GP_49.95_8.65			
GP_49.95_8.75			
GP_50.05_8.15			
GP_50.05_8.25			
GP_50.05_8.35			
GP_50.05_8.45			
GP_50.05_8.55			
GP_50.05_8.65			
GP_50.05_8.75			

Tabelle A 5: Verfügbare Daten der dynamischen Regionalmodelle C-CLM und REMO

Variable	Abkürzung	C-CLM ECHAM5	C-CLM HadCM3	REMO	Einheit
Zeitraum		1961 bis 2100	1951 bis 2100	1951 bis 2100	
Maximum Temperatur	TX	x	x	x	°C
Tagesmittel Temperatur	TM	x	x	x	
Minimum Temperatur	TN	X	x	x	
Tagessumme Niederschlag	RR	x	x	x	mm
Tagesmittel relative Feuchte	RF	x	x	x	%
Tagesmittel Luftdruck	PP	x	x	x	hPa
Tagesmittel Dampfdruck	DD	x	x	x	hPa
Tagessumme Sonnenscheindauer	SD	x	---	---	h
Tagesmittel Bedeckungsgrad	NN	x	x	x	octas
Tagesmittel Windstärke	FF	x	x	x	m/s
Potentielle Verdunstung	ET	x	---	x	mm
Globalstrahlung	GS	x	x	x	W/m ²

Tabelle A 6: Verfügbare Daten des statistischen Regionalmodells WETTREG 2010

Variable	Abkürzung	WETTREG 2010	Einheit
Zeitraum		1961 bis 2100	
Maximum Temperatur	TX	x	°C
Tagesmittel Temperatur	TM	x	
Minimum Temperatur	TN	X	
Tagessumme Niederschlag	RR	x	mm
Tagesmittel relative Feuchte	RF	x	%
Tagesmittel Luftdruck	PP	x	hPa
Tagesmittel Dampfdruck	DD	x	hPa
Tagessumme Sonnenscheindauer	SD	x	h
Tagesmittel Bedeckungsgrad	NN	x	octas
Tagesmittel Windstärke	FF	x	m/s
Potentielle Verdunstung	ET	x	mm
Globalstrahlung	GS	x	W/m ²

Tabelle A 7: Regenplan: Beispiel für den Monat Juli

Datum	Simulierter Regen (Liter pro Behälter)			
	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
3.7.				
4.7.				
5.7.	10,5	10,5	10,5	
6.7.	3	3	3	
7.7.	9	9	9	9
8.7.	7,5	7,5	7,5	7,5
9.7.				
10.7.				
11.7.	1,5			
12.7.	4,5	4,5	4,5	
13.7.				
14.7.	4,5	4,5	4,5	4,5
15.7.	3	3	3	3
16.7.				
17.7.				
18.7.	6	6		6
19.7.	4,5	4,5	4,5	4,5
20.7.				
21.7.				
22.7.	1,5	1,5	1,5	
23.7.				
24.7.				
25.7.				
26.7.	1,5			
27.7.	3			
28.7.	3	3	3	3
29.7.	1,5	1,5	1,5	1,5
30.7.				
31.7.				
1.8.				
2.8.				

Tabelle A 8: Vergleich der Kosten [in € / ha x a] für die Bewässerung von Zwiebel, Buschbohne und Spargel mit Rohrberegnung und Tropfbewässerung unter klassischen Anbaubedingungen, d.h. keine Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode

Bewässerungstechnik	Kultur	Periode	Kosten [€ / ha x a]				
			C-CLM (ECHAM5)	C-CLM (HadCM3)	REMO (ECHAM5)	WETTREG 2010 (ECHAM5)	Modellmittelwert
Rohrberegnung	Zwiebel	1971 - 2000	539,18	450,13	509,83	602,00	525
		2031 - 2060	591,52	475,97	499,36	686,46	563
		2071 - 2100	649,64	497,86	553,65	762,71	616
	Buschbohne	1971 - 2000	165,26	148,86	137,35	174,02	156
		2031 - 2060	166,39	149,40	137,41	179,55	158
		2071 - 2100	171,99	148,64	140,50	184,35	161
	Spargel	1971 - 2000	269,76	263,10	244,49	306,24	271
		2031 - 2060	280,51	279,16	249,46	325,00	284
		2071 - 2100	303,18	287,75	262,90	344,71	300
Tropfbewässerung	Zwiebel	1971 - 2000	4319,27	3480,62	4083,66	4832,08	4179
		2031 - 2060	4738,71	3678,51	3999,69	5510,35	4482
		2071 - 2100	5203,87	3743,83	4430,40	6122,45	4875
	Buschbohne	1971 - 2000	1323,07	1149,67	1099,37	1396,70	1242
		2031 - 2060	1473,67	1329,39	1079,76	1794,76	1419
		2071 - 2100	1814,24	1233,41	1279,42	2126,12	1613
	Spargel	1971 - 2000	2156,15	2030,21	1954,29	2457,97	2150
		2031 - 2060	2896,88	3509,43	2296,23	3731,58	3109
		2071 - 2100	4268,77	3690,73	3324,39	5184,83	4117

Tabelle A 9: Vergleich der Kosten [in € / ha x a] für die Bewässerung von Zwiebel, Buschbohne und Spargel mit Rohrberegnung und Tropfbewässerung unter variablen Anbaubedingungen, d.h. Verschiebung der thermischen Vegetationsperiode

Bewässerungstechnik	Kultur	Periode	Kosten [€ / ha x a]				
			C-CLM (ECHAM5)	C-CLM (HadCM3)	REMO (ECHAM5)	WETTREG 2010 (ECHAM5)	Modellmittelwert
Rohrberegnung	Zwiebel	1971 - 2000	538,57	530,57	517,16	570,47	539
		2031 - 2060	549,26	540,69	496,05	607,75	548
		2071 - 2100	578,23	580,14	519,30	617,63	574
	Buschbohne	1971 - 2000	156,24	142,92	147,82	178,26	156
		2031 - 2060	163,33	141,39	150,22	182,98	159
		2071 - 2100	167,65	141,89	150,34	186,26	162
	Spargel	1971 - 2000	242,14	214,46	253,62	284,50	249
		2031 - 2060	256,58	234,75	264,98	308,07	266
		2071 - 2100	283,67	246,49	282,05	332,58	286
Tropfbewässerung	Zwiebel	1971 - 2000	4313,79	4099,51	4142,84	4578,94	4284
		2031 - 2060	4398,86	4177,29	3972,91	4878,52	4357
		2071 - 2100	4630,53	4351,80	4153,43	4957,82	4512
	Buschbohne	1971 - 2000	1250,73	1103,68	1183,39	1430,81	1242
		2031 - 2060	1482,75	1089,07	1137,06	1604,37	1328
		2071 - 2100	1738,23	1035,22	1325,79	1722,77	1456
	Spargel	1971 - 2000	1935,49	1654,11	2027,33	2283,42	1975
		2031 - 2060	3026,45	3520,59	2622,37	3944,13	3278
		2071 - 2100	4793,37	3827,84	4101,52	5820,73	4636

Tabelle A 10: Vergleich tolerierbarer Herbst-Nmin-Gehalte in kg N/ha verändert nach Hennings und Scheffer (2000)

Bodenart	Sickerwasserrate in mm/Jahr			
	< 100	100 - 200	200 – 300	> 300
Sand (mS, gS, Su, fS)	15	20	30	40
Lehmiger Sand (St, Sl)	30	30	35	40
Lehm, Ton (Ul, Ls, Lu, Lt, Tu, T)	40	40	40	40

Quelle: Maschinen- und Betriebshilfsring Memmingen e.V.

<http://www.mr-memmingen.de/content/%E2%80%A6-zu-viel-ged%C3%BCngt-%E2%80%93-erfolgsparemer-herbst-nmin-teil-1>